

6G智能轨道交通白皮书



未来移动通信论坛
FUTURE MOBILE COMMUNICATION FORUM

目录

1.	前言.....	1
2.	6G 轨道交通覆盖技术概述.....	2
2.1.	6G 轨道交通无线信道.....	2
2.2.	6G 轨道交通覆盖技术.....	4
2.3.	去蜂窝大规模 MIMO 技术.....	6
2.4.	RIS 在高速移动场景中的应用.....	8
3.	6G 轨道交通传输关键技术.....	9
3.1.	面向未来高铁的智能快速随机接入.....	9
3.2.	面向高铁 6G 演进的多址接入技术.....	10
3.3.	OTFS 在智能高铁中的应用.....	13
3.4.	太赫兹通信在高速移动场景中的应用.....	14
4.	构建智能安全的 6G 轨道交通.....	16
4.1.	面向 6G 轨道交通的边缘智能技术.....	16
4.1.1.	面向 6G 轨道交通的边缘智能网络架构.....	16
4.1.2.	边缘智能技术.....	17
4.2.	轨道智能交通系统 6G 网络内生安全.....	18
4.2.1.	轨道交通 6G 网络面临的安全威胁与挑战.....	19
4.2.2.	轨道交通 6G 网络内生安全架构.....	20
4.2.3.	轨道交通 6G 网络内生安全关键技术.....	22
4.3.	轨道交通数字孪生网络.....	26
5.	轨道交通物联网技术.....	29
5.1.	高铁物联网监测及传输技术.....	29
5.1.1.	AI 助力的铁路物联监测技术.....	29
5.1.2.	时域功率分配增强的铁路传输技术.....	30
5.1.3.	无线射频供电驱动的高铁物联网技术.....	31
5.1.4.	无人机辅助的的高铁物联网传输计算技术.....	32
5.2.	绿色物联网反向散射技术在 6G 轨道交通中的应用.....	33
5.3.	面向智能高铁的基于 6G 的海量机器类通信.....	34
5.4.	通信感知一体化.....	35
	参考文献.....	39
	致谢.....	41

1. 前言

移动通信系统具有“使用一代、建设一代、研发一代”的发展特点，预计到2030年将实现第六代移动通信系统（Sixth-Generation, 6G）的商用。世界各国已经开始了6G研究，例如芬兰率先启动6Genesis旗舰研究计划，美国联邦通讯委员会为6G研究开放太赫兹频谱。2019年11月，我国科技部成立了6G技术研发推进工作组和总体专家组，以“创新、协调、绿色、开放、共享”为内涵的新发展理念，成为推动移动通信网络可持续发展的思路、方向和着力点，标志着我国6G研究正式开始。

交通是兴国之要、强国之基。2019年9月，我国颁布的《交通强国建设纲要》明确指出，到2035年，基本建成交通强国，到本世纪中叶，全面建成人民满意、保障有力、世界前列的交通强国。为了符合未来智能交通通信的愿景，铁路运输行业需要开发创新的通信网络架构和关键技术^[1]，以确保为乘客及铁路运营和控制系统提供高质量的传输。

6G通信系统是一个地面无线与卫星通信集成的全连接世界，可实现全球无缝覆盖，其不再是简单的网络容量和传输速率的突破，更是为了实现万物互联的“终极目标”。6G的数据传输速率可能达到第五代移动通信系统（Fifth-Generation, 5G）的50倍，时延缩短到5G的十分之一，在峰值速率、时延、流量密度、连接密度、移动性、频谱效率、定位能力等方面远优于5G。在超高速交通场景下，一些终端移动速度将超过1000km/h，需满足超高速下的超高安全性和超高精度定位需求。而5G定义的ITU指标仅支持500km/h的移动速度，对安全和定位精度没有定义。因此，对于未来智能交通应用场景带来的指标需求，仅依靠5G现有的网络和技术是难以满足的，需要未来的6G网络提供比5G更全面的性能指标，如超低时延抖动、超高安全、立体覆盖、超高定位精度等。

6G的发展将为多元化的服务质量（Quality-of-Service, QoS）需求、实时触觉交互、定制开放服务、通信融合、广播、计算、传感、控制、安全和人工智能等奠定基础。6G网络架构方面还需要进行创新，如空天地海一体化网络、全频谱全维度覆盖、智能自感知、机器学习、优化与演进等。另一方面，未来智能交通网络的潜在应用包括自动列车驾驶、协同列车网络、列车互联、超高清（4K/8K）列车视频、列车自组织网络和超精确（厘米级）列车定位。

在6G智能交通领域，国内外高校和研发机构相继提出了多种技术方案^[2]，但这些方案都处于概念阶段，能否成功实现还需更深入的研究与验证。欧洲铁路研究咨询委员会（ERRAC）制订了《Rail Route 2050》计划，提出基于6G的高资源效率、智能化2050年轨道交通系统发展蓝图。欧盟Hexa-X 6G项目面向高速移动场景和需求，定义了全新的6G智能网络架构，开发和实现6G各项关键使能技术。芬兰6Genesis研究计划将自动驾驶作为主要应用场景之一，设计了支持99.99999%可靠性、1ms时延、和1000 km/h超高速移动性的6G网络和技术。

为了满足6G智能交通应用的要求，需要全新的移动通信网络和技术突破，包括但不限于：

(1) 去蜂窝大规模 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 网络架构: 为了解决超高移动性导致的传统蜂窝网络中频繁的切换和巨大的开销问题, 去蜂窝大规模 MIMO 可保证无缝切换和高质量的覆盖。

(2) 通信-感知一体化技术: 针对铁路建设、装备、运营的各个环节和场景, 复用无线通信网络与基础设施的硬件设备、信号处理算法、通信协议等, 将接入终端、基站甚至轨道交通无线通信网络作为智能感知、透彻感知的载体^[3], 从而支撑轨道交通建设环境的监测检测、运营环境的监测检测以及智能高效绿色的无线通信。

(3) 人工智能与安全技术: 人工智能技术具有自学习、优化和演进的特点, 在 6G 智能交通网中的应用前景广阔。轨道交通的高效运行与高质量应用服务体验, 需要基于人工智能对海量数据及信道信息进行分析处理。同时, 为了保障关键信息、应用服务、以及运营的安全性, 又需要融合一系列安全相关的技术, 尤其是内生安全技术, 在轨道交通网络中实现可靠、安全的智能分析与计算。

(4) 新的超可靠超低时延 (Ultra-Reliable Low Latency Communications, URLLC) 技术: 为保证自动列车的行驶速度达到 1000 公里/小时以上 (如新兴的超级高铁系统), 进一步研究有限块码长下的新型 URLLC 帧结构来实现超可靠性和超低延迟之间的权衡也是至关重要的^[4]。

(5) 数字孪生网络: 对轨道交通网络进行实时的映射分析, 包括对列车运行状态进行感知处理, 对列车司机 (如紧张、醉酒、困倦、兴奋等) 的行为进行监控、预测和决策等, 对高铁的安全运营具有重要意义。基于 6G 的数字孪生网络可以从根本上改变列车及司机的历史和当前行为、状态的数字特征, 从而进行反馈控制并优化其性能。

通过应用 6G 新网络和新技术, 未来智能交通的网络、广播、通信、互动和安全将得到极大改善, 从而大幅提升人们的出行体验和效率。

2. 6G 轨道交通覆盖技术概述

2.1. 6G 轨道交通无线信道

轨道交通行业是国家经济发展的支柱产业之一, 在中共中央、国务院印发的《交通强国建设纲要》中明确指出要构建安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化综合交通体系, 打造一流设施、一流技术、一流管理、一流服务, 建成人民满意、保障有力、世界前列的交通强国。未来轨道交通将向着客运服务网络化、运输组织智能化、安全监控自动化等方向发展, 高效可靠的专用通信系统是轨道交通智能化建设的必要保障, 行业内对基于 6G 的铁路通信服务需求持续增长。

对电波传播特性及信道建模的研究是无线通信系统设计和评估的重要基础, 随着 6G 技术向全场景、全频段、全覆盖维度的拓展^[5], 6G 轨道交通通信场景呈现更加多元化和复杂化的趋势, 除了传统低频段车-地通信, 6G 轨道交通还将包括空-地通信、高频通信、物联网、车-车通信等新场景, 如图 1 所示, 这对 6G 轨道交通信道测量和建模的研究提出了新的挑战。当前, 6G 轨道交通无线信道的研究与应用主要存在如下难点与挑战。

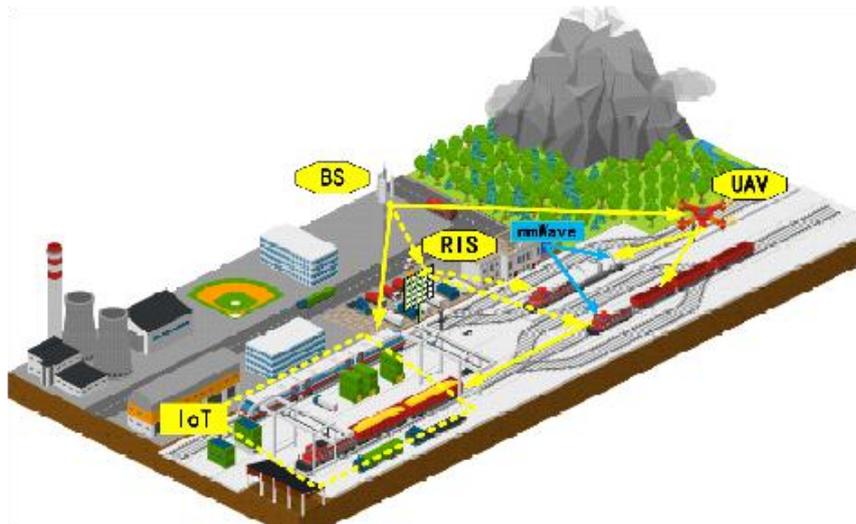


图 1 轨道交通 6G 通信典型场景信道示意图

(1) 轨道交通车-车通信信道

轨道交通车-车通信对全面保障 6G 轨道交通无人驾驶、自动驾驶、全自动运营等应用具有重要意义。6G 轨道交通车-车通信场景中，收发端列车的快速双移动会带来更加复杂的多普勒效应变化，并引起复杂的信道时变性，通信的广义平稳假设面临更大的挑战。此外，列车运行过程中收发端较长的通信距离、车体近端反散射体分布特性、复杂环境非视距传播等因素会极大地影响车-车无线信道的特性，对信号的可靠传输带来挑战。

(2) 轨道交通毫米波信道

毫米波通信可以为轨道交通提供更高的带宽和数据传输速率。然而毫米波频段的传播损耗相比低频段要高很多，除极高的自由空间传播损耗和车体透射损耗外，还会受到大气衰减、雨衰和植被衰减等因素的影响。此外，轨道交通中毫米波通信还需要克服比低频段更加严重的多普勒效应。高频段下轨道交通的高移动特性会使得信道的多径（簇）生灭特性加剧、非平稳特征更加显著、信道的变化特性更加难以建模，这为毫米波通信技术在 6G 轨道交通场景下的应用带来了更大的挑战。

(3) 轨道交通物联网信道

轨道交通场景下物联网可通过海量传感设备实时采集系统中各类设备、人员和环境信息，并进行实时的信息交互，实现轨道交通系统中设备、人、车等要素的全连接，大幅提升综合管理的智能化水平、可靠性和效率。在信道层面，轨道交通物联网中海量的接入设备、丰富的部署方式、随机变化的人流因素均会显著增加无线传播环境的复杂性，影响物联网节点的连通性能。此外，物联网全连接信道中多样化的无线传播链路，在传播距离、散射环境、发射功率、信号带宽、衰落特征等方面存在显著差异^[6]，这也为物联网信道特性的刻画和标准化模型的建立提出了更高的挑战。

(4) 轨道交通空-地信道

无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）等空中平台在未来 6G 通信中得到了广泛关注。由于其通用性和高移动性，无人机可以作为空中基站辅助提升 6G 轨道交通的通信质量。与传统陆地移动通信相比，无人机空-地通信具有很多新特点，如较高的飞行高度、三维高移动性、高视距传播概率等。但由于无人机载荷、供电、以及特殊区域禁飞等因素的限制，轨道交通场景下空-地信道测量难度很大，目前的一些测试及相关研究主要集中在静态非轨道交通场景、<6 GHz 频段及单天线配置等情况。此外，特定频段下大气、雨、雾等自然因素造成的信道复合式衰落特性也尚未得到充分研究。为充分探究 6G 轨道交通空-地信道特性，亟需开展典型场景下信道测量工作，深入分析空-地信道多径分布及其成簇规律，创建精准的空-地高移动性信道模型，以支撑 6G 轨道交通场景下空地协同通信系统的设计。

(5) 轨道交通智能反射信道

可重构智能面（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS）技术的出现为 6G 轨道交通通信覆盖的增强及传输性能的提升提供了更多的技术选择，尤其适用于 6G 轨道交通复杂场景下超可靠覆盖的保障。目前大多数研究主要将 RIS 部署在建筑物表面，而在轨道交通场景下 RIS 可以更加灵活的部署在铁轨沿线，也可将 RIS 部署在无人机上通过空中 RIS 来解决轨道交通特殊场景的可靠通信难题。然而，当前对 RIS 信道的研究依然处于起步阶段，大规模 RIS 振源电磁辐射及传播损耗特性、电波智能反射传播过程的解析分析、基于几何的 RIS 随机性信道建模、高速移动状态下波速的精准调控及相位设计、RIS 振源幅相特性与无线信道的相互影响机制、以及典型场景下的信道实测等均缺乏深入研究，直接制约着轨道交通场景下 RIS 技术的应用。

(6) 轨道交通智能电波预测

6G 轨道交通无线信道的研究中，人工智能技术在信道特征提取、信道学习与状态分析、智能电波预测等方面得到广泛的应用，能够全面提升无线电波预测的智能化程度和准确性。一方面，人工智能技术将支撑对 6G 轨道交通信道数据特征的深度挖掘，建立数据-特征-场景-无线电波之间的复杂关联；另一方面，人工智能将借助所挖掘的无线电波与历史数据、场景等信息的复杂关联，充分利用轨道交通轨迹固定的特点，实现智能化的无线电波预测，全面改变轨道交通无线电波覆盖预测的模式，构建基于大数据的电波预测数据库和模型库，提升轨道交通覆盖预测与优化分析的智能化水平和准确性。

2.2. 6G 轨道交通覆盖技术

随着我国轨道交通网络的迅猛发展，以信息及通信技术驱动的轨道交通高质量服务需求也在持续增长。根据党中央国务院发布的《交通强国建设纲要》，未来轨道交通将逐步向着智能化、智慧化的方向发展，这需要加快推动 6G、大数据、人工智能等技术与轨道交通行业深度融合，构建泛在先进的轨道交通信息基

基础设施。为了实现这一愿景，轨道交通需要高效可靠的专用通信系统，而通信网络的覆盖质量是轨道交通通信系统的重要基础性指标。6G 轨道交通场景和业务应用更加丰富，通信场景高可靠深度覆盖的需求显著提升。考虑到轨道交通场景移动性高、环境复杂、网络结构时空频尺度跨度大、资源属性差异大、以及存在多类型和全场景的异构业务，如何实现容量和能效约束下的高可靠电波覆盖将成为未来轨道交通建设发展的主要瓶颈之一。由于未来 6G 网络的基础设施将从平面到立体延伸、从局部到全球延伸、从中低频段向高频段延伸，无人机、智能超表面、毫米波、超大规模天线、精准波束追踪等将成为 6G 轨道交通覆盖扩展技术的重要驱动力，如图 2 所示。



图 2 轨道交通场景下 6G 覆盖扩展技术应用示意图

与传统陆地通信相比，UAV 通信具有诸多新特点，如较高的视距概率、更加灵活的部署方式等，可以作为空中基站提升 6G 轨道交通各类复杂恶劣传播场景下的覆盖质量。但高动态传播环境、极端天气条件、以及空-地信道反散射体分布及传播机制等因素，增加了 UAV 空-地信道建模的难度，这也成为评估 UAV 辅助 6G 轨道交通覆盖性能的关键。此外，UAV 的能量受限性也是影响无线覆盖性能的重要因素之一，有必要通过轨迹优化算法降低 UAV 能耗，从而满足 6G 轨道交通高效绿色覆盖的需求^[7]。UAV 复杂三维运动姿态是影响无线覆盖性能的另一重要因素，可以通过优化 UAV 仰角、时间分裂因子等参数，在给定的可容忍中断概率下最大化覆盖范围，提升 6G 轨道交通覆盖的广度。在 UAV 辅助的无线网络覆盖中，需要针对 UAV 立体协同组网方式构建立体协同移动跟踪覆盖机制，从而提高地面大规模接入节点的覆盖深度。UAV 也可用于轨道交通应急场景非均匀业务需求下的按需覆盖和动态资源适配，通过空中基站的联合部署，在地面轨道交通网络存在的前提下利用低空 UAV 携带基站进行扩展覆盖，并在地面轨道交通网络损毁情况下提供高可靠应急覆盖。

毫米波技术可为 6G 轨道交通提供更高的数据传输速率。然而轨道交通的覆盖范围较大，电磁波在毫米波频段的传播损耗相比低频段要高很多，除路径损耗外，还会受到大气衰减、雨衰和植被衰减等因素的影响。因此，将毫米波用于轨道交通无线覆盖的主要问题在于如何克服高传播损耗、植被衰减、阴影衰落等因

素的影响。一方面可以考虑在车站等可提供短距离通信的场景下部署毫米波系统以提升特定业务需求的传输速率，另一方面可以将 6G 超大规模 MIMO 与波束成形技术结合，利用超大规模天线阵列产生的高增益定向波束抵消毫米波信号在传输过程中的损耗，提高毫米波波束的覆盖广度，实现轨道交通场景下覆盖性能的提升。此外，全双工技术允许无线通信设备在同一频段上同时发送和接收信号，可成倍地提升通信系统的容量。通过将全双工技术引入毫米波通信系统，部署在列车车体顶部的中继基站，优化带宽资源的分配机制，进而大幅度提升 6G 轨道交通无线覆盖的质量。

然而，由于毫米波较大的穿透损耗和较低的反散射能量，轨道侧基站和列车终端之间的可用无线传播路径减少，这依然严重影响了 6G 无线覆盖的有效范围。为了进一步改善覆盖，可以通过部署 RIS 提供额外的反散射能量，实现高增益波束，提升覆盖质量。RIS 是包括大量无源反射元件的平面，每个无源反射元件能够独立地对入射信号引起可控的幅度和/或相位变化，可用于 6G 轨道交通场景通信覆盖及传输性能的提升，尤其适用于轨道交通复杂场景下高可靠无线覆盖的保障。一方面，将 RIS 引入到轨道交通通信系统中，基站（Base Station, BS）侧可以配备更少的天线，从而降低硬件成本和能耗；另一方面，通过适当部署 RIS 抵抗通信路径的遮挡，扩大覆盖范围，RIS 幅度和相移的可编程属性也可用于解决轨道交通场景中的多普勒效应和衰落问题，提高系统的频谱效率。此外，当前 RIS 的研究大多将反射面部署在建筑物表面，而轨道交通场景下 RIS 的部署可以更加灵活，可在轨道沿线环境中的各类基础设施上部署，例如轨道侧、列车车窗、车厢内壁等。RIS 也可部署在 UAV 上，通过空中 RIS 来解决 6G 轨道交通复杂场景下的通信可靠传输问题，从而保障轨道交通复杂场景的可靠覆盖。

切换是轨道交通无线通信系统的重要环节，也是保障高可靠连续性覆盖的关键。在高速移动场景下，由于信道的快速时变特性，相邻基站之间可能存在移动终端的频繁切换，导致切换失败率高、通信中断概率高，无法满足用户高速且稳定的传输速率需求，严重影响着 6G 轨道交通无线覆盖的平滑度。此外，实际铁路往往要经历高架桥、隧道、平原、丘陵、山区等复杂多样的地形，这对切换算法提出了更高的要求。在基于位置的切换算法中，当列车驶入重叠带时，相邻两基站动态调整波束成形增益，实现随移动终端的波束跟踪，该方法可以提高终端设备接收到的信号强度，进而达到提升切换成功率的目的。此外，还可以通过利用预测的参考切换点触发切换，以减轻切换过程中的中断概率，为轨道交通通信系统提供更平滑的 6G 无线覆盖。

2.3. 去蜂窝大规模 MIMO 技术

在高速移动场景中，移动性带来的多普勒频移会造成严重的通信系统性能损失。而去蜂窝大规模 MIMO 技术能够充分利用空间自由度及宏分集增益，从而获得高系统性能和均匀网络覆盖，使其成为面向未来无线通信高移动性要求的潜在技术之一。去蜂窝大规模 MIMO 技术是传统大规模 MIMO 的演进技术，同时也是蜂窝网络迈向无蜂窝网络架构的巨大跳跃。去蜂窝大规模 MIMO 系统包含多个分布式接入点（Access Point, AP），这些 AP 通过前传链路连接到中央处理单元（Central Processing Unit, CPU），并利用相同的时频资源为网络中的所

有用户同时进行服务。因此去蜂窝大规模 MIMO 技术能够增强网络覆盖，提供均匀的频谱效率，并且该网络架构中不存在传统的小区概念和小区边缘效应。

由于铁路特别是高铁的蓬勃发展，高铁通信也引起了学术界和工业界的极大关注。高架桥和隧道是高铁无线传播环境中的两种典型场景，比如京沪高铁 86.5% 的路段使用高架桥，这就导致高铁场景无线传播环境几乎不存在散射和反射路径，因此视距（Line-of-Sight, LoS）信道的假设被广泛用于高铁无线通信的分析。然而在高铁实际场景中无线传播环境是极其多样化的，除高架桥、隧道外，列车还可能在车站、山区、森林、市区等多种地形中行驶，这些场景下无线传播环境存在丰富的散射路径。因此，还需要考虑非视距（Non-Line-of-Sight, NLoS）路径来准确刻画高铁无线通信信道。基于 K 因子的莱斯（Rician）衰落信道能够有效描述高铁通信中无线信道的 LoS 和 NLoS 分量，因此可以被用于高铁通信的信道建模以得到重要的分析结论。

此外，正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）技术被应用于铁路长期演进技术（Long-Term Evolution for Railway, LTE-R）以实现与现有地面蜂窝网络的无缝连接。然而，在高铁的高速移动场景中多普勒频偏会造成严重的子载波间干扰从而降低高铁通信系统的性能。另外在高速移动下的快速信号处理和频繁的基站切换也是高铁通信系统设计的两个挑战。而解决这些问题可能的有效方法是采用分布式的大规模 MIMO 网络架构，原因是分布式天线系统架构可以减少不必要的基站切换，从而降低切换失败和链路中断的概率。但在分布式天线系统中仍然需要简单的基站快速切换方案来提供超可靠和低延迟的高铁通信。而去蜂窝大规模 MIMO 系统作为分布式大规模 MIMO 架构的新框架可以完全消除小区边缘，因此非常适合在高铁通信中应用。虽然去蜂窝大规模 MIMO-OFDM 已经有了相关研究，但目前都是基于静止的场景，而忽视了子载波间干扰问题。因此去蜂窝大规模 MIMO-OFDM 系统在高铁通信中的应用部署依然是个亟待解决的问题。

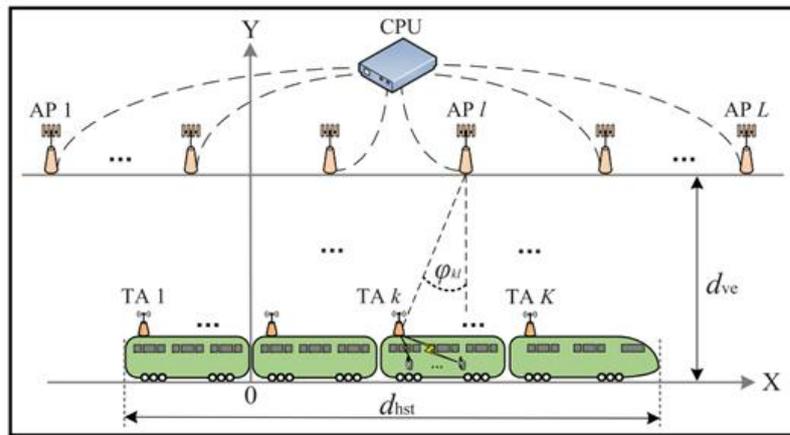


图 3 基于去蜂窝大规模 MIMO-OFDM 的高速移动网络架构图

在如图 3 所示的基于去蜂窝大规模 MIMO-OFDM 的高铁通信系统中，主要面临可扩展部署和严重的多普勒频移两大问题。

由于 AP 数量随着铁路线的长度不断增加，总的信号处理计算复杂度和前传容量要求也将趋于无穷大，导致 AP 协作和功率控制算法在实际的应用中将面临无法扩展到大型网络的问题。基于以车载天线为中心的动态协作聚类（Dynamic

Cooperation Clustering) 思想可以设计出可扩展的去蜂窝大规模 MIMO-OFDM 系统以应用到整个铁路系统。

在去蜂窝大规模 MIMO-OFDM 高铁通信系统中不同的车载天线产生的多普勒干扰是不同的,因此可以利用不同的发射功率在一定程度上消除干扰以补偿高速移动导致的性能损失。例如可以根据不同目标需求使用启发式分数(Fractional)功率控制算法、最大最小化(Max-Min)功率控制算法以及最大和速率(Max-Sum)功率控制算法等。

2.4. RIS 在高速移动场景中的应用

当载波频率增加时,由于较大的穿透损耗和较低的散射水平,导致发射机和接收机之间的有用传播路径减少,无线传播条件变得更具挑战性。在这种情况下,可通过部署和利用智能超表面提供额外的散射来改善传播条件,通过朝所需的接收器创建无源波束成形,实现高波束成形增益。

RIS 是包括大量无源反射元件的平面,每个无源反射元件能够独立地对入射信号引起可控的幅度和/或相位变化。通过在无线网络中密集部署 RIS 并智能地协调其反射,可以灵活地配置发送器和接收器之间的信号无线信道,从而提供解决信道衰落损害和干扰问题的新方法。RIS 在实施方面也具有优势。首先,它的反射元件仅能被动地反射或透射信号,而无需任何发射射频(Radio Frequency, RF)链,因此需要具有低数量级的硬件或能源成本;并且, RIS 以全双工模式运行,没有任何天线噪声放大和自干扰;此外,由于 RIS 通常具有轻便和保形的特点,因此可以很容易地将其安装在环境物体上。

高速移动列车(High Speed Train, HST)通信具有特殊的场景特性。首先,列车高速移动引起的多普勒效应始终是无法避免的问题。其次,列车车厢造成的信号穿透损耗会降低系统性能。最后,对于多用户同时接入新的基站来说,频繁的切换是一个很大的挑战。因此,非常有必要将 RIS 引入到 HST 通信系统中进行研究。在 RIS 辅助的 HST 系统中,BS 可以配备更少的天线来实现承诺的 QoS,从而实现低硬件成本部署和降低能耗。此外,通过创建虚拟视距路径,可以适当部署 RIS 来抵抗通信路径的遮挡,以及扩大覆盖范围,从而减少频繁的小区切换。幅度和相移的可重新配置属性也可以用于解决多普勒效应和衰落问题,提高系统的频谱效率。

考虑到高速移动性和列车的特性,在 RIS 辅助的 HST 通信系统中可以考虑三种不同的应用场景网络架构,如图 4 所示。

一种直接的方案是在铁路一侧(例如在广告板上或者建筑墙体上)部署 RIS,以帮助扩大覆盖范围。当 RIS 的位置在两个 BS 之间时,可以用具有成本效益的 RIS 替换某些 BS。这样的部署可以减少频繁切换,并减少由于使用有源 BS 而引起的硬件成本。BS 和 RIS 之间的信道是准静态的,并且假定具有很强的 LoS 路径。第二种网络架构是, RIS 部署在列车的窗户上。此处, RIS 是透明表面,可以控制透射参数以提供更好的通信服务。由于 RIS 到 UE 的距离越小, RIS 与 UE 之间的路径损耗就越小。与室内情况类似, RIS 也可以放置在列车的墙上。从 BS 发送的信号通过窗口到达 RIS,然后 RIS 配置反射系数并将信号反射到接收机。



图 4 基于 RIS 的高速移动网络架构图

从信号处理的角度考虑实用的 RIS 辅助 HST 通信系统，下面将分别介绍信道估计、波束成形设计和波束跟踪的关键挑战。

准确的 CSI 估计对于性能的提升非常重要。RIS 辅助 HST 通信系统的信道估计存在以下挑战。首先，难以准确估计快速变化的信道；其次，多普勒效应将带来估计误差，这将在设计波束成形时降低系统性能。在高速移动场景中，需要采用鲁棒的波束成形设计，使其可以在一定的信道估计误差范围内带来性能增益。鲁棒的波束成形设计，可以考虑两种 CSI 误差模型，即在有界 CSI 误差模型中，目标是最大化最小 SINR 以保证 QoS 要求，而在统计 CSI 误差模型中，则是保证中断概率不超过规定大小。为了保证高速移动性，波束跟踪是一种可行的解决方案。可以利用某些运动预测滤波器（例如卡尔曼滤波器）来跟踪时变的 BS-列车信道。此外，波束选择算法可以基于预定的分层码本设计选择跟踪 BS 到列车的信道。

3. 6G 轨道交通传输关键技术

3.1. 面向未来高铁的智能快速随机接入

未来高铁将向着客运服务网络化、运输组织智能化、安全监控自动化等方向发展，形成智能高铁。大规模物联网是智能高铁的一个重要应用领域，图 5 所示为智能高铁大规模物联网示意图。拓展的物联网业务有智能行车编组调度、乘务组动态调度、移动票务系统、旅客行李安防系统、货运管理信息系统、铁路集装箱联运系统等。

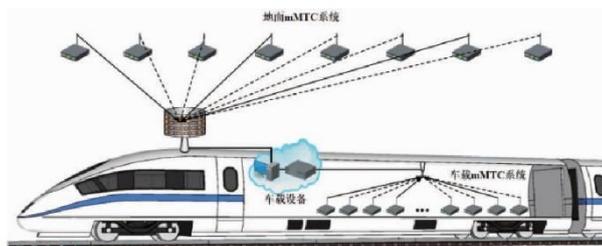


图 5 智能高铁大规模物联网

基于授权的访问控制需要上行请求进行良好的预测、额外的控制信令或信息交换，以促进资源的授权。高铁大规模物联网所服务的地面设备往往具有低功耗要求，因而业界引入了免授权随机接入过程以降低设备的信令开销。

一般来说，免授权随机接入是指用户设备无需与基站建立连接即可接入无线网络。因此，检测某一时刻哪些设备需要接入无线网络成为免授权随机接入的关键。一般而言，物联网数据流量通常情况下是偶发的，即在一个特定时隙内所有的潜在设备只有少部分处于激活状态，设备的激活信息是稀疏的。因此，采用基于稀疏理论的压缩感知技术来检测激活设备成为必然。

随着人工智能、深度学习的快速发展，其强大的表达能力和计算能力符合通信系统中对系统数据快速准确处理的要求，因此考虑将深度学习引入通信领域的相关研究中，处理复杂的通信系统问题。由于传统的压缩感知算法往往需要大量的迭代次数，收敛速度较慢，人们开始运用深度学习的方法来尝试加快稀疏恢复的收敛速度和检测准确率。将压缩感知算法的迭代形式展开为前馈的神经网络，通过学习得到网络中的参数，可以大大提高检测活跃用户的准确率。也有研究将自编码器（Auto Encoder）、长短期记忆神经网络（Long Short-Term Memory, LSTM）等深度学习中常用的网络引入到随机接入的设备活跃度检测中，进一步提高检测的准确率，实现快速准确的随机接入。

同时，由于大规模用户的接入需求和有限的频谱资源之间存在矛盾，传统正交多址无法满足大规模用户，进而需要考虑非正交多址接入方式。非正交多址技术能够提供更高的频谱利用率和较高的连接过载率，其系统可利用有限频谱资源服务大规模用户的免授权随机接入。除了新兴的串联扩频多址技术、稀疏码分多址接入等，也有研究开始使用深度学习算法来设计非正交多址接入的星座图，从而实现更好的检测性能。

当前免授权随机接入仍存在许多亟待解决的问题：目前的压缩重构算法需要消耗相当的计算资源，必然给整个通信系统带来极高运算复杂度，影响算法实用性和实时性；压缩感知框架下，用户所需发送的前导序列长度理论下界值可指导序列长度的自适应选择，减少序列存储、传输开销，具有重要的研究意义，但目前对其理论的分析仍然任重而道远；通信中往往存在异步的情况，这会导致基于压缩感知的活跃用户检测算法性能急剧恶化，甚至失效，这也是压缩感知算法在大规模随机接入实用化中面临的一大挑战，但目前对该问题的研究较少^[8]。

3.2. 面向高铁 6G 演进的多址接入技术

高铁智能化应用的实现需要一系列海量的新型感知设备进行支撑。然而，现有电气方式的基础装备存在电缆用量大、传输能效低、系统能力有限等问题，严重制约高铁智能化发展。因此需要考虑结合先进移动通信技术来打造铁路沿线的大规模物联网平台，使海量的传感器可以对综合高铁系统中的移动设备、固定设施、自然环境及其他相关要素等进行全面透彻的信息感知。如图 6 所示，在高铁中，6G 海量机器设备形成的大规模物联网可以应用于设备故障检测、钢轨探伤、环境监测、周界安防等多种感知业务。但是，在高铁大规模物联网的研究中，仍存在许多问题亟待解决，如面向高铁大规模物联网接入技术的大规模用户高可靠接入需求、用户缺乏协作、信道资源稀缺、多普勒频偏及信道快速时变等。

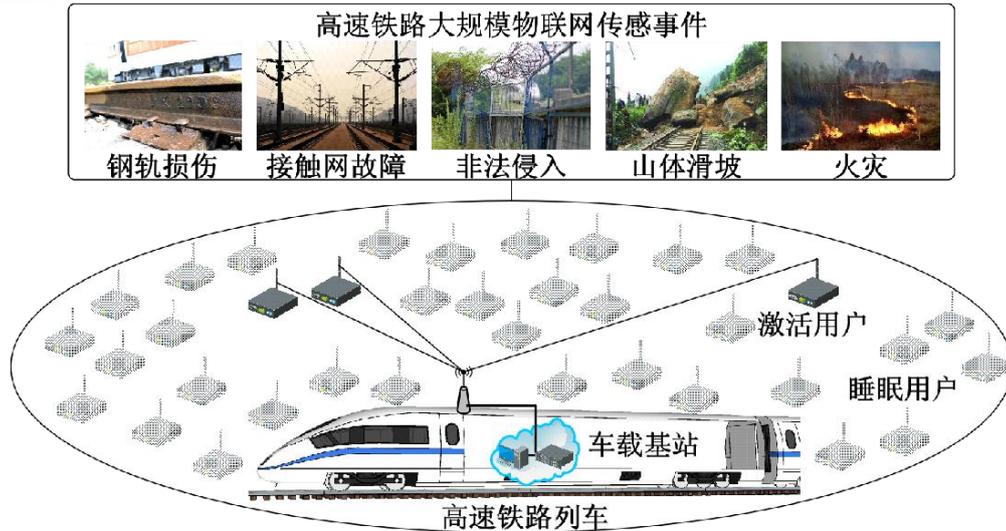


图6 面向高铁物联网的大规模机器通信场景

串联扩频多址技术（TSMA）是一种适用于大规模机器通信系统（massive Machine Type Communication, mMTC）的多址接入技术。在 mMTC 中，一个基站需要支持大量各类设备的随机接入。其中，随机接入可以分为基于调度的随机接入和免调度的随机接入。在基于调度的随机接入系统中，数据的传输过程是由控制信号进行协调，从而可以避免碰撞。但是，协调大量用户连接的控制信号的资源开销是巨大的。而在免调度随机接入系统中，传输过程不被协调，可节约相应的控制信号资源开销。然而，由于缺乏协调，这种传输是匿名的，于是用户识别必须在免调度随机接入系统的众多用户接入设计中考虑。同时，自主性的传输会造成用户数据包碰撞的不确定性。针对以上两个挑战，相关研究提出了串联扩频多址技术。其基本思想是将用户数据包划分为段，然后进行段编码，生成冗余段，并使用多个序列扩频对这些冗余段进行扩频。因此，碰撞只发生在特定的数据段，并可以通过冗余段来解决，从而通过牺牲用户的数据传输率来实现高连接性和高可靠性。

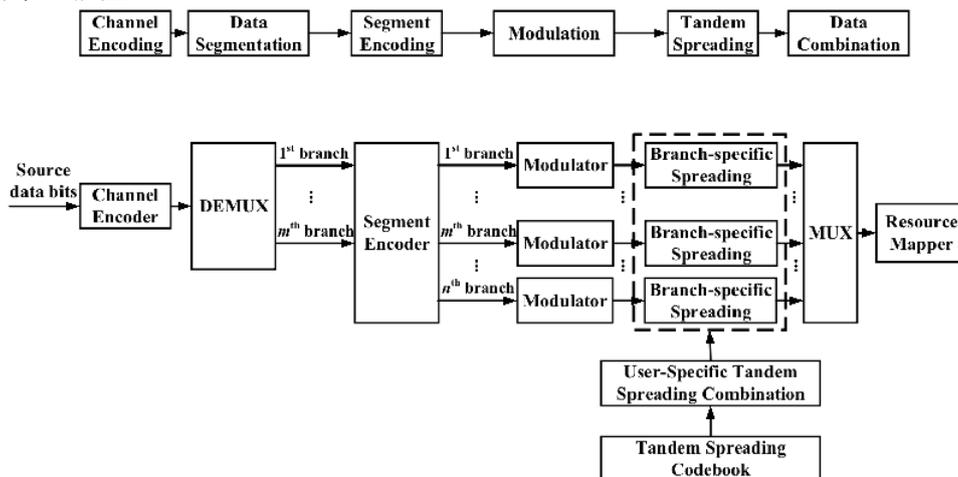


图7 TSMA 用户发射机示意图

TSMA 发射机如图 7 所示^[9]，用户终端发送的原始比特流先经信道编码，然后根据系统输入参数生成的段编码码本完成数据分段及段编码，发射机进而对段编码后的数据进行调制，并再一次根据码本中扩频序列组合方式完成串联扩频，而后进行发送。与传统的发射机相比较，TSMA 引入了段编码及串联扩频。其中

段编码将信道编码后的用户数据比特进行分段，并以段为单位进行编码以生成冗余数据段。串联扩频则是在调制之后利用多个扩频序列对不同编码数据段上的调制符号进行扩频。在串联扩频中，TSMA 提出了串联扩频码本来规定不同编码数据段上扩频序列的选取。同时，用户在不同数据段上所选取的扩频序列组成了表征该用户身份的串联扩频组合。

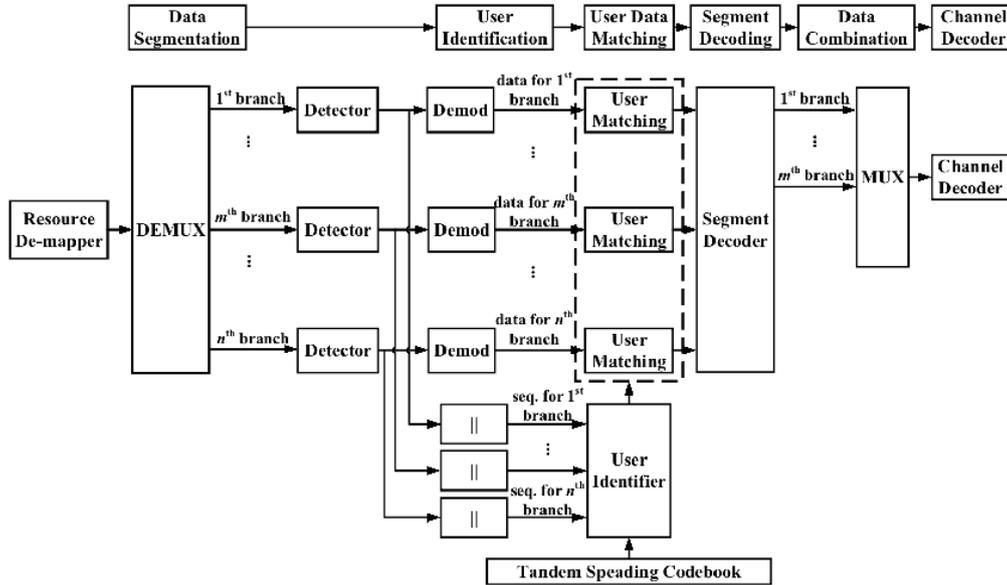


图 8 TSMA 接收机示意图

TSMA 接收机如图 8 所示^[9]，接收机在收到来自激活用户的叠加信号后，首先将该信号进行分段，然后通过能量检测来检测每个编码段的潜在正交扩频序列。TSMA 针对串联扩频码本进行了设计以使每个用户具有唯一的串联扩频组合，因而接收端可根据不同段上所检出的正交扩频序列实现用户识别。在用户识别之后，通过相对应的正交扩频序列组合对每个已识别用户的信号进行解扩。而后在段解码中，接收机根据已识别用户的扩频序列组合来获得识别用户的碰撞段，并利用相应的冗余段进行恢复。

在面向高速移动的大规模多址接入场景中，新型多址方案的设计存在两个矛盾。其一为如何在有限信道资源下实现大规模用户的高可靠免授权接入，即如何解决“协作缺乏、有限信道-大规模用户高可靠接入”这一矛盾；其二为如何在高速移动场景中处理多普勒频偏及信道快速时变以实现可靠传输，即如何解决“高速移动-可靠传输”这一矛盾。

为此，考虑结合 TSMA 技术和正交时频空（Orthogonal Time Frequency Space, OTFS）技术，提出 OTFS-TSMA 多址方案。OTFS-TSMA 方案的核心思想在于资源映射方案的设计，同时需要考虑时延多普勒（Delay Doppler, DD）域的信道特性。如图 9 所示，在基于理想收发波形的 OTFS 中，DD 域信道冲激响应（Channel Impulse Response, CIR）作用下的资源元素呈现出二维循环移位特性。故可设计交织/解交织方案，使得 Doppler 和 Delay 资源元素的二维循环移位转化为用户数据中的可恢复循环移位。另外，由于 TSMA 方案是基于正交扩频的，故可选择具备循环正交性的离散傅里叶变换序列作为扩频序列集，基于此，可将 DD 域资源块二维循环移位转化为多普勒资源块、数据段、符号和码片的循环移

位。针对多普勒资源块移位，考虑传输环境中用户的多普勒特性，以进行无组间干扰的用户分组；针对数据段移位，考虑设计具有循环移位鲁棒性的 TSMA 码本，以实现有效的段循环移位恢复和数据识别；针对符号移位，考虑设计导频添加和识别方案，以实现各段数据有效的符号移位恢复；针对码片移位，考虑针对码片移位的特征，分别补偿各数据段中由循环移位带来的相位偏移。此外，OTFS-TSMA 方案可利用多普勒资源块移位带来的多径分集，通过采取多种合并技术，提升数据接收的可靠性。

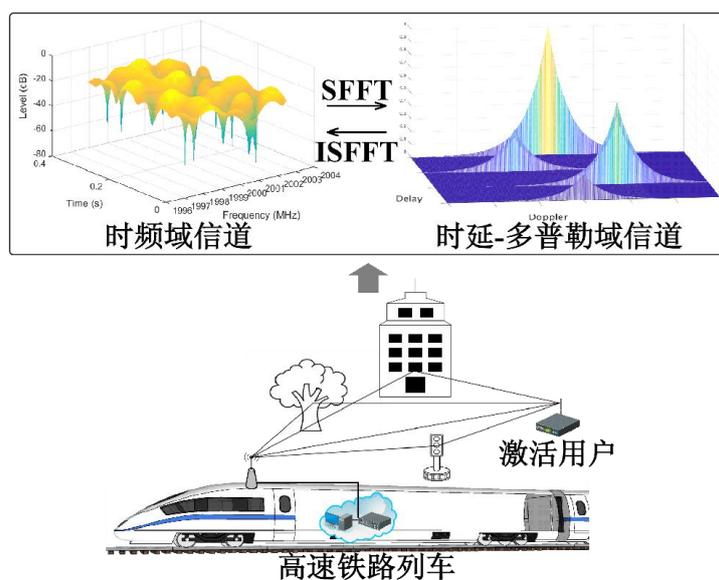


图 9 时频域信道与时延-多普勒域信道

3.3. OTFS 在智能高铁中的应用

随着智能高铁的快速发展，高速移动场景逐渐成为 6G 通信中的主要场景之一。但是通信环境的复杂性，以及列车速度的不断提升，收发机之间的相对运动产生的多普勒效应显著，为可靠通信带来极大的挑战。目前，采用正交频分复用技术在实现高速率传输的同时，可以有效对抗多径信道带来的符号间干扰。但多普勒效应破坏了子载波间的正交性，从而产生载波间干扰，进而影响 OFDM 在高速移动场景下的性能。针对载波间干扰，现有文献主要使用载波频偏估计和补偿。然而，随着速度的不断提升，信道的相干时间不断降低，频偏估计和补偿的难度加大。芬兰大学提出的首份 6G 白皮书中指出，OFDM 对于宽带连接非常有效。当传输带宽达到极限时，传统的收发器设计就会开始失效，且多载波调制机制难以正常工作。因此，需要更强大的新型模拟调制方案。

为了对抗智能高铁场景下的多普勒频移问题，正交时频空作为新型二维多载波调制技术于近期被提出。OTFS 可以看作是一种特殊的时频扩展技术，其中每个 QAM 符号都由在整个时频网格上扩展的二维基函数承载。当被视为时频扩展技术时，OTFS 表现出与任何类型的多载波调制方案（包括常规 OFDM）均具有架构兼容性。可以灵活地设计 OTFS 数据包以填充时频网格的任意区域，并与信道参考信令的任何约定兼容。OTFS 作为一个扩展频谱，可抵抗窄带干扰和全分

集增益。OTFS 的抗干扰能力使其成为支持覆盖在常规数据包上的超可靠、低延迟通信包的理想之选。

不同于 OFDM 采用时频域复用符号，OTFS 采用延时-多普勒域进行复用。发送符号经逆辛有限傅里叶变换（Inverse Symplectic Finite Fourier Transform, ISFFT）转换到时频域。接收端进行对应的反变换。在延时-多普勒域中，信道呈缓慢变化且稀疏的特征，可有效对抗智能高铁场景下快速时变信道带来的时频域双弥散效应。OTFS 可以保证智能高铁在高度移动场景下通信的可靠性。与此同时，延时-多普勒域符号与信道之间的二维卷积关系给信道估计和符号检测带来了挑战。延时-多普勒域有效且低开销的信道估计算法和低复杂度的符号检测算法的设计是 OTFS 领域的最受关注的研究方向之一。

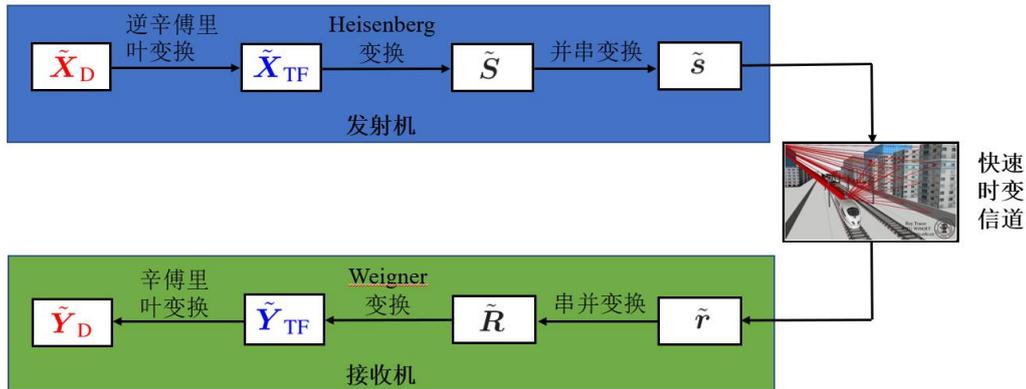


图 10 智能高铁场景下 OTFS 性能信号处理流程图

OTFS 二维新型多载波调制方案抵抗了高多普勒频移的影响，保证了智能高铁场景下通信的可靠性，OTFS 联合其新型信道估计算法和符号检测方案推动了智能高铁通信以及 6G 又快又好的发展。

3.4. 太赫兹通信在高速移动场景中的应用

近年来，世界范围内的铁路服务需求持续增长，未来高铁将向着客运服务网络化、运输组织智能化、安全监控自动化方向发展。一方面，为进一步强化高铁运行安全并提高运营效率，铁路物联网、铁路多媒体调度、高清晰度视频安全监控等新的列车运营相关业务和应用不断涌现；另一方面，随着新型的移动应用如在线高清视频、在线互动游戏、虚拟现实等爆发式的增长，旅客宽带移动通信需求激增，尤其是流媒体业务占比不断攀升，给无线网络的运营和维护带来了难以想象的挑战。针对未来高铁发展的新业务与应用需求，需要具有高带宽、高数据传输速率的铁路移动通信系统来支撑。

太赫兹（THz）波是一种波长位于毫米波和红外光波之间的电磁波，其波长和频率范围分别为 0.03 mm~3 mm 和 0.1THz~10THz。太赫兹频段具有极大的未被分配使用的带宽，能够支持 100Gbps 以上的数据传输速率，并且具有更好的保密性及抗干扰能力。因此，将太赫兹通信引入未来高铁无线通信系统，将极大地缓解日益增长的业务需求与网络容量之间的矛盾。由于频点高，太赫兹通信面临较高的传播损耗，需要收发端均采用高度方向性的波束来弥补链路损耗。另外，太赫兹具有近光特性，因此链路对障碍物的遮挡比较敏感。

此外，考虑到高速列车的高速移动性，高速列车在小区的驻留时间较短。高速移动性也导致信道快衰落、多普勒效应、频繁小区切换等，对无线信号传输造成严重影响。同时，铁路交通部署区域广泛，轨道沿途运行环境复杂多变，如城市、乡村、山区等多种典型场景，建筑物或地形结构等会对无线链路造成随机短时遮挡，严重降低车地链路质量。考虑到高清晰度视频安全监控等列车运营相关业务以及高速列车中聚集的大量用户，车地间以及车车间的数据业务需求量巨大。因此，如何在列车高速移动时实现大容量的车地以及车车间数据传输成为高铁通信系统面临的关键挑战之一。借助太赫兹通信极高的传输速率，车地以及车车通信可利用太赫兹频段在信道条件好时进行机会通信，在短时间内完成大容量数据传输。

另一方面，高速列车车厢间采用虚拟或无线技术进行连接成为未来智能高速列车的发展方向。太赫兹通信的高速率低干扰优势使其成为虚拟连接的备用技术。将太赫兹通信应用于车厢间通信，将极大地提升车厢间虚拟联接的传输速率，为智能高速列车的发展提供技术支撑。因此，太赫兹通信在高速移动场景中的应用可以考虑三种不同的情形，如图 11、图 12、图 13 所示。

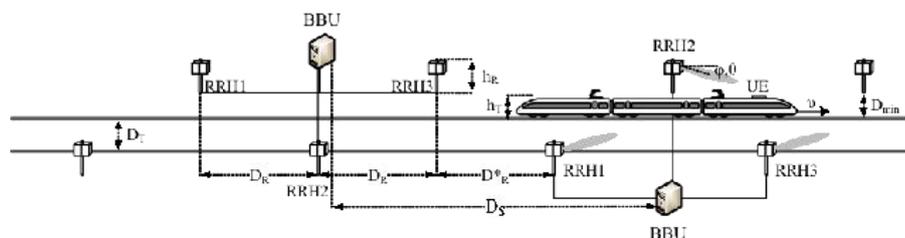


图 11 太赫兹车地通信

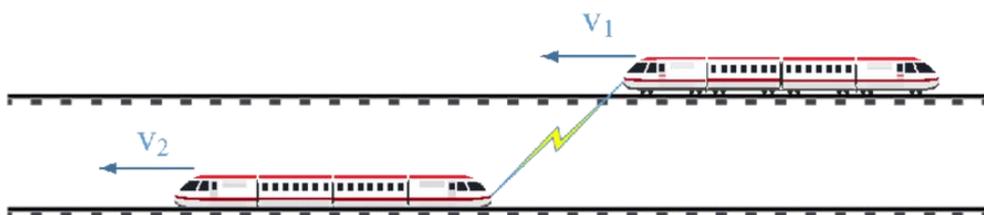


图 12 太赫兹车车通信

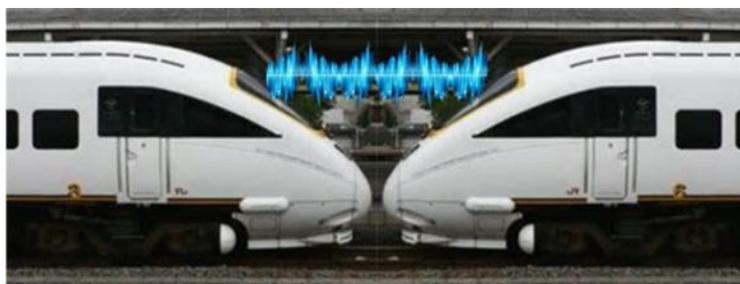


图 13 太赫兹虚拟联接

首先，太赫兹频段用于车地通信如图 11 所示，采用分布式基站架构。每个小区由一个基带处理单元（Baseband Processing Unit, BBU）与三个射频拉远单元（Remote Radio Head, RRH）组成。其中 BBU 安置于机房内，通过光纤与所属小区范围内的三个 RRH 相连接。各 RRH 平行部署在轨旁，旅客用户设备通过

车顶中继 MR 与路边相应的 RRH 采用太赫兹频段进行数据传输；其次，太赫兹频段用于车车通信如图 12 所示，两列同向行驶的列车，通过太赫兹链路进行车车通信；此外，太赫兹虚拟联接如图 13 所示，车厢间通过太赫兹链路进行高速率连接。

然而，将太赫兹通信应用到高铁通信系统仍存在以下几点挑战。

(1) 由于太赫兹传播损耗高，需要收发端采用极细的高增益方向性天线进行通信。在高速移动状态下，如车地通信或车车反向行驶情况，如何保证收发端的波束对齐成为关键挑战。由于列车行驶轨迹固定，且多数情况为直线行驶，可利用列车的位置信息辅助车地间的波束对齐。列车的位置信息可通过列车控制系统获取，或通过保证覆盖的低频段通信的 CSI 信息预测得到。

(2) 由于太赫兹通信容易受障碍物遮挡，当由于遮挡发生链路中断时，如何进行波束调整以快速恢复链路保证通信质量也是太赫兹应用的难点之一。可选的解决方案有备份波束切换、重新波束扫描等。另外，也可通过资源分配实现机会通信，充分利用信道条件好时的通信，以保证非延时敏感业务的通信质量。

(3) 由于太赫兹通信范围受限，高速移动状态下将面临频繁的越区切换，如何高效地完成越区切换以保证车地通信传输，也将成为太赫兹在高铁无线通信中应用的难点之一。

4. 构建智能安全的 6G 轨道交通

4.1. 面向 6G 轨道交通的边缘智能技术

4.1.1. 面向 6G 轨道交通的边缘智能网络架构

面向轨道交通的网络连接在 6G 时代将全面“提速”，边缘计算技术的引入和人工智能手段的融合，为轨道交通在 6G 时代的发展提出了新的憧憬。轨道交通场景中，列车内的边缘智能服务器同边缘数据中心间协同交互通信，支撑业务场景的部署、实施，边缘数据中心通过异构网络和计算资源的池化，为智能化的实现提供了坚实的底座。图 14 为面向 6G 轨道交通的边缘智能网络架构。图中体现为两层边缘智能架构，一层为移动边缘智能实体，另一层为边缘数据中心。移动边缘智能在轨道交通场景中为车载边缘计算实体，主要实现用户在车内低时延类业务的提供，以及车内接入用户对实时信道获取的智能化预测。边缘数据中心则补充移动边缘智能实体因业务场景限制等因素未能实现的用户需求。

从保证轨道交通业务服务质量和资源合理分配的角度出发，6G 时代的轨道交通边缘智能网络需要满足云化、智能化和服务化的特征。

(1) 云化

轨道交通场景需满足灵活安装、灵活接入和业务灵活部署的特征，云化部署方式有助于资源的统一调度、业务的快速部署和网络功能的灵活组合，保证轨道交通各种功能的可靠性，为管理人员提供更简洁的运维方式。

(2) 智能化

轨道交通 6G 网络的目标为实现内生智能，为了满足多种接入场景信道的动态变化、车厢内高并发业务需求，以及资源的合理调度和业务内容缓存等多种需求的驱动，多种智能化算法需要协同部署和应用，实现智能交通智慧大脑。（3）

（3）服务化

采用服务化的方法能达到架构模块化、无状态、独立化的特点，可实现 RAN 功能灵活快速部署，充分利用云中间件能力，加速轨道交通场景应用的实施落地，支持未来 6G 轨道交通场景智能化的快速部署和实现。

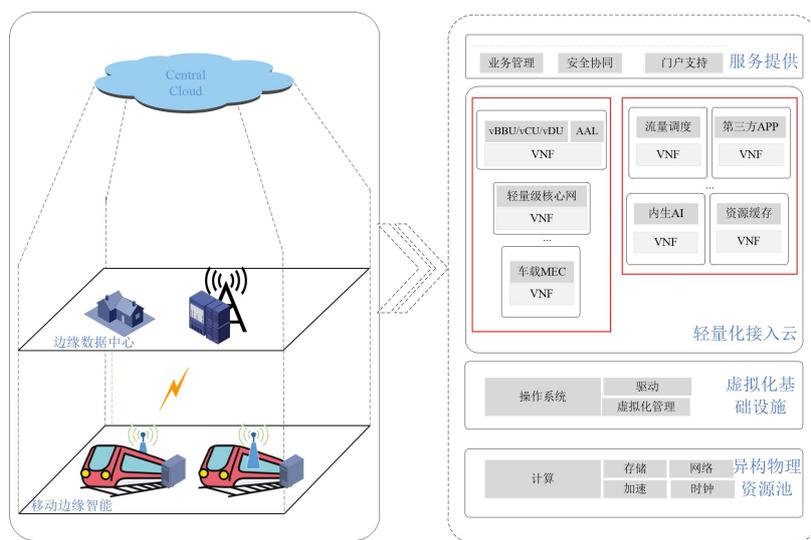


图 14 面向 6G 轨道交通的边缘智能网络架构

4.1.2. 边缘智能技术

6G 系统将是无线网络和人工智能技术之间深度融合的产物。移动边缘计算（Mobile Edge Computing, MEC）是基于移动通信网络的一种分布式计算方式，通过在基站侧构建微型云服务环境，靠近用户处理业务，形成内容、应用与网络的协同优化，可同时解决大量实时数据处理的时延限制和数据安全隐私问题。随着人工智能和机器学习功能被大量部署到 MEC 上，进一步形成了边缘智能。对于无线接入网而言，边缘智能以通用的微服务平台架构，既能为用户业务提供本地化的人工智能和机器学习功能从而降低接入网和骨干网之间的通信负载，又能针对业务模式对无线通信进行优化，充分体现了 6G 通信时代感知、通信、计算、存储一体化的优越性。

以高铁为代表的通信场景与业务需求都有鲜明的行业特色。首先是信道场景复杂多变，涉及到高架、隧道、车站、山地等多种场景，每种场景下的信道都有各自鲜明的物理特性；其次是列车路轨沿线基站都是带状覆盖，难以利用城市里的宏基站、微基站的多层次网状覆盖、多点协同方式来提升无线信号覆盖的质量或系统容量，或者提高系统容量的成本过于高昂。带状覆盖的特点是信号强度必然随着列车在相邻基站之间的位置改变而呈现起伏波动，无法带来稳定的信道容量，会严重影响上层业务的服务质量。另一方面，轨道交通特点是移动轨迹固定，因此可以利用人工智能、机器学习技术在列车运行时在线学习和训练不同信道场

景下的模型特征，并对短时间内的信道及其容量变化及进行精准的实时预测，以便支撑用边缘智能对用户业务进行计算服务和通信机制的联合优化。

从业务场景上，高铁和城市轨道交通的业务在列车运行中主要包括列车运行控制类业务和旅客通信信息业务两类。列车运行控制业务包括自动驾驶控制、运行状态监测、列车内外部实时视频监控等，特点是实时性要求高，上行传输信息量远大于下行信息传输，上传包含传感器采集信息、视频图像、机器学习模型参数等多种数据，具有数据类型异构、业务到达模型和服务质量要求差异大等特点。尽管如此，用于列车运行控制的传感器和视频监控等业务的流量到达模型具有很强的规律性和可预测性，因此为上行传输资源分配和调度提供了可利用的模型信息。对于旅客通信信息业务，通过车载基站和 MEC 可以为乘客提供更好的网络覆盖、多种业务的内容缓存和计算卸载等服务，但这也导致大量位置集中的用户并发业务对车载基站无线资源和 MEC 计算存贮资源的激烈竞争。特别地，当大量的用户终端同时向 MEC 进行计算卸载，并发的无线传输会形成严重的互相干扰从而提高每个终端的通信传输错误概率，并且造成 MEC 的任务队列拥塞而延长了每个任务的等待时延。

基于 6G 无线边缘智能，对上述高铁和城市轨道交通的通信问题可以采取如下的技术方案：

(1) 针对车-地通信的动态变化的信道情况

在车载 MEC 上实时训练基于机器学习的信道预测模型，并在列车不运行时采用离线的联邦学习技术交换不同列车的本地模型训练参数，从而使所有列车上的信道识别与预测模型收敛于全局最优的统一模型，再用全局模型来更新每列车载的机器学习模型。车载 MEC 基于列车运行中的实时信道预测，并结合列控传感器、监控视频等业务到达的模型，可以对上行无线传输采用动态随机最优化策略，以满足不同业务的服务质量需求。

(2) 针对车厢内大量用户终端的并发计算卸载业务

由于不同用户终端所需的计算服务不一样，构成了一个超密集网络场景下的动态卸载问题，带来了干扰和 MEC 计算负载的不确定性。此时可以采用平均场博弈方法协调大量密集分布终端的计算卸载的上行计算卸载和传输策略，从而实现系统的总能耗和 MEC 处理时延最小化。

4.2. 轨道智能交通系统 6G 网络内生安全

未来的智能轨道交通系统以强大的轨道交通大脑为核心，通过塑造一个可信的交通环境来保障人们安全出行。第六代移动通信网络作为信息交互的基础设施，将基于软件定义切片平台与边缘计算（Edge Computing, EC），充分利用人工智能（Artificial Intelligence, AI）与大数据挖掘的融合革新来支持更多样化的轨道交通应用场景与更高目标的性能要求，但这也使得网络安全形势发生重大变化。一方面网络逐渐边缘化、软件逐渐虚拟化导致轨道智能交通系统网络安全边界逐渐模糊，网络架构所引发的安全缺陷越来越凸显；另一方面，边缘计算、人工智

能与大数据挖掘的深度泛在融合,也使得轨道交通场景下边缘网络数据安全问题面临着前所未有的新挑战^[10]。

现有典型的轨道交通通信网络在设计之初都缺乏架构级的安全考虑,其安全防护依靠外挂式、补丁式的方案,因而依靠现有的安全防护技术无法实现未来轨道交通智能交通系统 6G 网络的无缝安全通信保障^[11,12]。构建安全可信的智能轨道交通系统 6G 网络(简称轨道交通 6G 网络)迫切需要在建网规划的同时充分考虑通过内置安全防护体系提高自身安全防御能力,使其业务能力和安全能力得到融合发展,从而实现智能轨道交通 6G 网络的内生安全。

4.2.1. 轨道交通 6G 网络面临的安全威胁与挑战

轨道交通 6G 网络自身的开放性和支撑轨道交通多业务场景的特性,使得 6G 网络自身的安全问题和业务应用的安全问题相互交融,这将主要带来以下几方面的安全威胁与安全挑战。

(1) 轨道交通列车控制系统安全威胁

轨道交通列车控制系统(简称列控系统)是一个庞大而又复杂的安全控制系统,主要由中心设备、车站设备、轨旁设备和车载设备组成,上述设备通过列控安全数据网络进行数据信息交换,提供安全控车服务。在早期的列控系统网络设计过程中,更多的关注功能安全(Safety)而非网络信息安全(Security),主要通过网络物理隔离和边界防火墙实现最基本的防护以应对网络攻击威胁。随着信息化的快速发展,一直以来被认为相对封闭、专业和安全的轨道交通控制系统已不再是一座安全的“孤岛”,致使列控系统设备、主机、网络、数据极易遭受来自外部及内部的网络安全攻击^[13]。

(2) 远程云服务平台管理安全威胁

6G 网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)使基础设施云化成为趋势,因而模糊了智能轨道交通系统安全防护边界,改变了传统网元设备物理安全隔离的现状,导致传统网络安全发生了变化,带来了新的安全威胁。具体表现为虚拟化环境内部通信安全(恶意代码或病毒、DoS 攻击、DDoS 攻击、垃圾邮件等)、虚拟化管理安全(权限滥用,密码、账号盗用等)、网络功能安全(伪造/篡改软件包)等^[14];计算、存储及网络资源共享化,导致引入虚拟机安全、虚拟化软件安全、数据安全等问题;部署集中化,用户、应用和数据资源聚集^[15],数据泄露与被攻击风险加大,且引入通用硬件导致病毒能够在集中部署区域迅速传播,漏洞更容易被攻击者发现和利用,受攻击影响范围广、危害大^[14]。

(3) 隐私保护和通用大数据安全威胁

智能轨道交通系统是综合计算、网络和物理环境的多维复杂系统,需要通过 3C 技术,即计算、通信和控制的有机融合与深度协作,实现车-地、车-车的实时感知、动态控制和信息服务。随着轨道交通智联时代的到来,车载终端、高铁监测传感设备等会产生大量的数据,然而在一些要求高精度、低时延的应用场景下,例如列车自动驾驶、远程操控维修等,在云端完成计算已无法满足应用需

求，越来越多的人工智能应用需要迁移到边缘端。然而传统的深度神经网络需要将边缘设备采集到的海量大数据传输到集中式服务器进行训练，这在一方面会大量的占用网络带宽，另一方面难以保证传输数据的隐私安全。

(4) 接入终端安全威胁

海量异构终端不仅意味着网络内部与外界之间有了更多不安全的攻击入口，也对网络接入认证协议、接入控制协议提出了更高精度的要求，现有机制尽管提高了用户身份认证过程的安全性及身份保密性，但依然存在接入后的合法用户被跟踪、用户服务被降级甚至掉线的漏洞。同时，智能轨道交通系统 6G 应用将采取多样化软件定义切片网络，由于切片接口开放、切片间协议差异等增加了接入攻击口，使终端接入的安全形势变得更为严峻。因此，终端安全面临着恶意终端身份伪造、可信终端接入受阻、接入终端干扰降级、被追踪的安全挑战，6G 网络终端安全机制应从身份认证增强的角度保障海量异构终端设备的接入真实、接入可信以及接入终端的防跟踪防掉线保护^[10]。

(5) 网络侧安全威胁

行业应用驱动下的大规模异构设备连接、泛在智能与网络通信计算能力的不断下沉，也为网络侧安全带来了新的威胁与挑战。网络节点的分布式部署及边缘节点自身资源的局限性，使得边缘网络面临着边缘数据受威胁、网络状态易探知、分布式架构难防御等安全挑战。对于边缘数据安全保护，网络侧安全既应充分保障大规模异构小数据的保密性与完整性保护，提高数据抗篡改、抗伪造的能力，又应全面地增强边缘数据的安全共享能力，以支撑轨道交通 6G 网络基础设施融合共享开放的新局面。同时，边缘网络应提高安全感知能力与分布式防御能力，通过多样化抽样的感知、多维化的威胁分析与高可信的风险预判，形成网络内生的主动安全免疫力，增强对异常边缘节点的流量控制、安全隔离与高优先级的状态处理机制，使网络具备缓解攻击和抵御自保的安全能力^[10]。

4.2.2. 轨道交通 6G 网络内生安全架构

轨道交通 6G 网络将实现全面升级，由原来的关注互联网安全向重视网络空间安全演进，网络安全的内涵和外延将不断扩大。智能轨道交通 6G 网络将在系统设计之初就植入防御机制，增强网络机体自身的“免疫力”^[16]，它以 AI 为引擎，实时监控系统状态并研判潜在的安全风险，并将抵御恶意入侵攻击与预测危险相结合^[17]，从而实现智能化的内生安全，即“风险预判，主动免疫”。基于这种内生安全框架，智能轨道交通 6G 网络将推动新一代身份安全、重构网络纵深安全、泛终端与物联网安全、云数据中心安全建设、大数据应用与流转安全、实战化的安全运行等工程任务，从而与轨道交通行业的信息化发展相融合。图 15 展示了基于 6G 的智能轨道交通通信网络内生安全架构。

从硬件设备支持、数据信息共识、安全态势感知、攻击防御方法等角度出发，轨道交通 6G 网络的内生安全需要满足 4 个方面的需求，即：智能共识、智能防御、可信增强和泛在协同^[17,18]。

(1) 智能共识

轨道交通场景下的智能共识是指通过联网的智能设备（如物联网接入网关或智能终端和设备）的信息交互和协同形成共识，并基于分布式节点的共识来排除干扰，从而保障轨道交通各类运营关键信息的完整性、一致性和可用性，为信息和数据提供高安全等级的保护。

(2) 智能防御

轨道交通 6G 网络防御的目标，目前已经从已知威胁防御开始向未知威胁防御转变。为了应对海量未知威胁，安全防御体系逐步开始向基于 AI 的自动化对抗演进。基于 AI 和大数据技术、精准部署更高级的安全功能并优化安全对抗策略，实现主动的纵深安全防御。

(3) 可信增强

使用可信计算技术，为轨道交通 6G 网络基础设施、软件等提供主动免疫功能，增强基础平台的安全水平。

(4) 泛在协同

通过轨道智能交通系统中的各类终端、边缘节点、通信管道、云基础设施的泛在协同，准确感知整个轨道交通 6G 网络安全态势，敏捷处置安全风险。

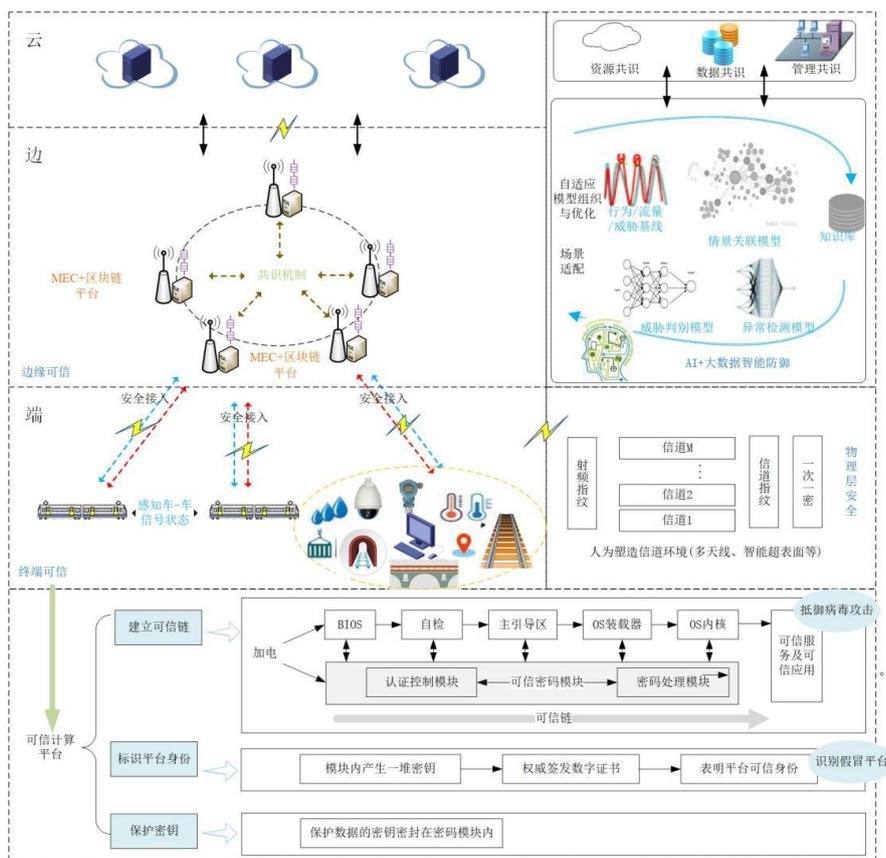


图 15 基于 6G 的轨道交通通信网络内生安全架构

4.2.3. 轨道交通 6G 网络内生安全关键技术

(1) 区块链技术

作为 6G 的核心关键技术之一，内生安全将和分布式、去中心化的无线网络体系结构智能适配。6G 自身所蕴含的边缘节点分布式和去中心化等特征，使得区块链技术能够用来提升 6G 内生安全性能^[18]。区块链技术是一种综合了分布式存储、点到点传输、新型共识机制及加密算法等多种技术的新型技术。区块链利用许多现成的加密机制，加密地将用户伪身份与标记资产交易联系在一起，并创造性地建立一种共识机制，可以在大量的无信任节点间提供关于全局分类账本和数据状态的共识。区块链具有数据不可篡改、操作受监督及无需高成本处理中心等突出优势，可以有效的保证链上数据的安全性^[16]，能够在互不可信的的多方设备间建立一种安全可靠的协作机制，为 6G 安全提供支撑。未来，区块链在智能轨道交通系统 6G 网络中可应用于公专融合网络的频谱智能安全共享和在轨道交通物联网中提供分布式安全机制并设计轻量化的算法。

针对前述轨道交通所面临的安全威胁，区块链在轨道交通中主要可以采用三种部署方式：分别是面向云服务平台部署、面向轨道网络边缘侧部署以及面向接入终端用户侧部署，如图 16 所示。

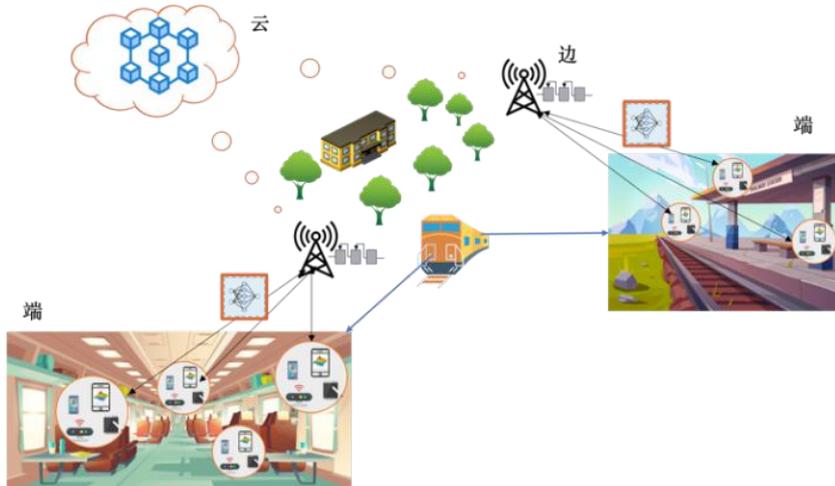


图 16 基于区块链的轨道交通可信网络架构

① 面向云服务平台

主要针对轨道交通集成系统（如列车集中调度系统）的安全，区块链直接部署在云端服务器节点之上，通过将数据存储链上，确保数据的安全与隐私。云端服务器收集来自各基站的网络运行数据，并通过在云端利用人工智能算法进行处理分析，从而实现对全局安全态势的感知分析。

② 面向轨道网络边缘侧

主要针对轨道网络边缘侧的信息安全。其中，区块链节点部署在配备边缘服务器的基站之上，可以实现对网络接入设备以及节点运行信息的可靠收集存储。基于所收集的即时数据和区块链历史数据，基站节点可以利用边缘计算、人工智能等技术对风险进行分析和预判，提升系统整体的安全防护水平。

③ 面向接入终端用户

主要针对接入终端设备的安全。区块链节点部署于基站之上，负责维护区块链系统的运行。网络接入设备则作为区块链的用户节点，具有访问区块链的权限。进一步，通过结合分布式机器学习（如联邦学习）等技术，可以直接在接入终端设备运行分析进程。不仅可以降低原始数据泄露的风险，而且基站通过收集返回的结果并进行综合研判，还可以提升系统整体的异常检测与安全防护能力。此外，区块链节点可以有效建立对终端用户的接入认证以及访问控制机制，从而增强身份认证的可靠性，提升对终端用户的安全防护等级。

区块链的引入可以显著增强轨道交通 6G 系统的安全性与可靠性。基于以上部署方式，区块链在轨道交通 6G 网络中有着广泛的应用场景，具体包括网络切片管理、D2D（Device to Device）通信、资源共享和频谱管理等。

① 网络切片管理

网络切片是实现 6G 网络资源调度和服务保障的关键。但现有网络切片管理方案高度依赖于单个运营商的资源池，难以实现跨运营商的全局管理。通过利用区块链作为去中心化的管理平台，可以将不同网络中跨运营商的资源都上链，通过智能合约等进行打包交易，从而实现更加系统化的全局网络切片管理。区块链的引入，可以有效的提升网络切片管理的安全性，并且进一步降低运营成本。

② D2D 安全通信

轨道交通网络中的 D2D 通信允许在设备间直接进行通信与数据共享。而现有的 D2D 通信模式由于缺乏信任管理机制，阻碍了终端设备的有效参与。通过区块链在设备间建立可信认证以及激励机制，可以增强 D2D 通信的安全性以及可靠性。

③ 资源可信共享

轨道交通无线网络中的资源包括计算、存储、数据等资源，分布式资源共享可以有效的利用终端设备的资源，提升整体服务体验。区块链的引入在资源提供方和需求方之间建立了安全可信的桥梁，有效的扩大了资源共享的范围，可以更好的激励资源在分布式用户间合理调配。

④ 跨频段频谱管理

为了更好的适用“人、机、物”系统，轨道交通 6G 网络中需要挖掘并利用多种频率资源。基于区块链的频谱共享机制可以有效的实现跨频段的频谱动态共享，解决无线频谱供需矛盾问题，使得无线频谱共享过程更加透明化。随着 6G 网络的密集化，基于区块链的无线频谱共享将成为未来发展的一个主要趋势。

但同时在 6G 网络中，系统的超低时延指标也给上述区块链的应用提出了新的挑战。传统“重型”区块链的运行效率难以适应轨道交通 6G 网络的低时延要求。为此，可以考虑在轨道交通 6G 网络中设计和部署轻量级的新型区块链系统架构（例如区块链分片），从而进一步缩短链上数据的认证和校验时延，提升区块链的吞吐量以及运行效率。

(2) 时空匹配可信增强技术

与传统的可信计算概念不同，在面向轨道智能交通的 6G 网络可信控制中，除了对设备进行可信认证之外，还应对列车的运行时间和空间等因素进行综合的认证，如图 17 所示。

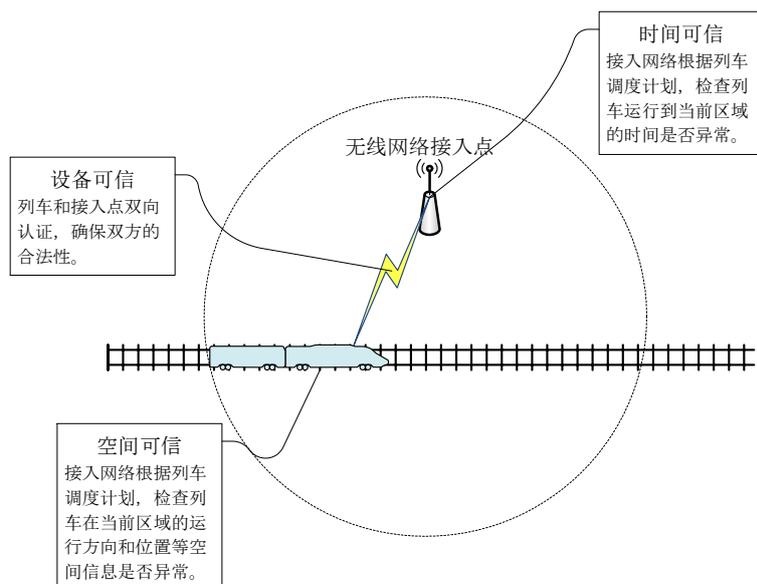


图 17 面向轨道智能交通系统 6G 网络的可信增强技术

(3) 可信认证技术

轨道交通具有运行密集、轨道固定、运行时间稳定的特点，通过设备可信认证、时间可信认证和空间可信认证的多维规则匹配，保证只有合法的列车或设备才可以接入到 6G 网络中，从而确保轨道智能交通系统 6G 网络安全性。同时，在这个过程中可以对异常的时空信息进行发现、报告和处理，可以提高轨道交通的智能化水平，减少轨道交通运行事故发生的概率，提升列车运行的正点率和效率等。但由于列车运行速度快，时空信息变化迅速，如何实现精准的匹配，从而保证非法用户无法接入网络存在很大挑战。

（4）智能入侵检测技术

智能入侵检测技术将实现轨道交通场景下安全自动化的处理、快速的检测以及快速的响应。相比于传统消费互联网中人的行为的复杂性与不确定性，轨道交通系统中的业务数据和行为模式相对简单，列车行驶轨迹和时速固定，流量模型可预测。同时，由于网络切片的使用，隔离了各种不同业务特征的网络流量，便于对异常行为进行检测。入侵检测的基本思路是通过网络数据流量特征的分析，抽取数据特征，进而识别入侵行为。传统入侵检测大多采用统计学或利用算法抽取数据包主要特征，建立分类模型的方法对入侵行为进行识别^[19]。基于统计和基于数据包的检测方法，都存在不足，如基于数据包的检测往往对算力有较高的要求，而基于统计的方法往往只能在攻击发生后才能检测。引入 AI 技术可以更加准确地对轨道交通业务流量与行为的异常进行检测、回溯与根因分析，为用户提供实用化的安全分析与告警，抵御各类高级持续性威胁（Advanced Persistent Threat, APT）攻击，并适应对未知入侵风险行为的识别^[20]。

（5）无缝快速安全切换

磁悬浮列车等承载的终端的移动速度将超过 1000 km/h，这对轨道交通 6G 网络在超高移速下支持实时通信业务和高精度定位业务提出挑战。无线接入点或无线接入基站的覆盖范围有限，而列车运行的距离长、时间快，导致轨道交通车地通信存在着频繁的网络切换过程，为减少切换不及时造成网络中断的影响，目前大多采取推迟执行切换认证的策略，但这无法保证列车运行全程的无缝安全性。如何解决轨道交通车地信息传输中的安全需求和实时高效可用之间的矛盾是可信切换认证问题中的关键难点。传统的切换认证机制，会造成网络存在非可信的连通状态，需探索实现一种适合于轨道交通无线网络的可信切换预认证机制，保证车辆高速运行时信息传输的安全性和实时性。可考虑基于预认证的思想将认证信息流和列车行驶路线相匹配，利用预认证信息直接装配相关数据，减少关联、认证等交互步骤，从而实现无缝快速安全切换。

（6）大数据安全隐私保护技术

为满足高精度、低时延、高可靠的应用场景需求，越来越多的轨道交通人工智能应用需要迁移到移动边缘计算端。智能高速列车计算任务可在本地或卸载传输到 MEC 完成。然而传统的深度神经网络需要将边缘设备采集到的海量数据传输到训练侧，难以保证传输数据的隐私安全。联邦学习作为分布式学习的一种，可以使得车载终端自主感知周边环境、采集数据，然后自主进行本地训练得出本地训练模型，最后通过整合不同本地训练模型来得出更新后的全局训练模型。联邦学习这一架构，避免了原始数据的传输，提升了系统整体通过内生结构实现隐私保护的能力。通过联邦学习这一可信协同框架，可以打破数据孤岛的壁垒，进一步实现网络、设备间保护隐私的互联互通。

在实际应用中，将联邦学习部署到轨道交通 6G 网络中，主要可以采取两种部署方式：面向终端和面向基站。在面向终端的方式中，可以将车载终端、移动用户设备等作为联邦学习的参与客户端，在其本地训练联邦学习模型。覆盖这些终端设备的基站则作为联邦学习的服务器，负责参数聚合；在面向基站的方式中，

基站作为联邦学习的参与客户端，宏基站或者云服务器则作为聚合服务器。面向终端的方式可以更好的利用终端资源和保护数据隐私。而面向基站的方式则具备更大的训练数据规模、更强的计算能力，并且能更好的应对网络拓扑的动态变化。此外，为了进一步提升针对大数据的隐私保护能力，可以通过将区块链节点与 MEC 节点耦合，将车载终端上传的本地训练模型数据记录在区块中，通过智能合约完成全局训练模型自动化的整合，从而增强聚合过程中的安全性。通过引入联邦学习和区块链的方法，既减少了网络中的通信数据量，又可以让采集数据只在本地进行处理从而保证其隐私性，还可以避免因联邦学习本身的中心化聚合方式带来的弱安全性。

总之，未来的轨道交通 6G 网络将构建不依赖补丁式安全增强方案的可信安全体系，遵循“自适应”、“自主”、“自生长”三大原则演进，同时引入标识区块链、可信计算和人工智能威胁感知等技术，提升网络体系内生的安全强度，达到身份真实、控制安全、通信可靠、数据可信的安全目标。为可信的交通环境和便捷安全出行构建防护长城。

4.3. 轨道交通数字孪生网络

由于列车的高速移动性，轨道交通的网络拓扑及网络状态不断动态变化，这给轨道交通系统的实时运行调度及分析决策带来了较大的挑战。为了应对轨道交通网络动态变化的系统状态，可以应用数字孪生技术对轨道交通系统进行建模分析及映射，从而实现实时的状态感知、分析决策及运行控制等。

数字孪生技术是一种新兴的数字化技术，它能够充分利用物理模型、传感器数据、设备运行的历史数据等，通过集成多学科、多物理量、多尺度的数字镜像过程，实现在虚拟数字空间中对物理实体的精准映射。不同于传统的建模仿真等，数字孪生通过与物理实体间的双向交互，可以实时对物理实体进行一对一的映射。数字孪生技术通过优化、预测分析、容错控制以及自动化过程等，可以有效地密切监测系统的运行状态、减少系统运行维护开销、提升系统的可靠性及运行性能。

随着 5G、物联网等信息技术的发展，轨道交通正在进入数字化、智能化、信息化、自动化的新时代。与此同时，网络规模的日益扩大与接入物联网终端设备的迅猛增加，也使得轨道交通网络呈现出复杂多样、动态快变的特点。尤其是随着 6G 研究的推进，如何在轨道交通网络中实现泛在的智能连接，是智能轨道交通网络所面临的巨大挑战。通过引入数字孪生技术对网络状态实时感知分析，可以有效提升网络连接性能与智能计算的效率，从而提升轨道交通的运行效率与应用服务质量。在数字孪生驱动的轨道交通网络中，物理实体可以为传感器终端、物联网设备、车辆终端等，也可以是某个应用服务、业务系统等。

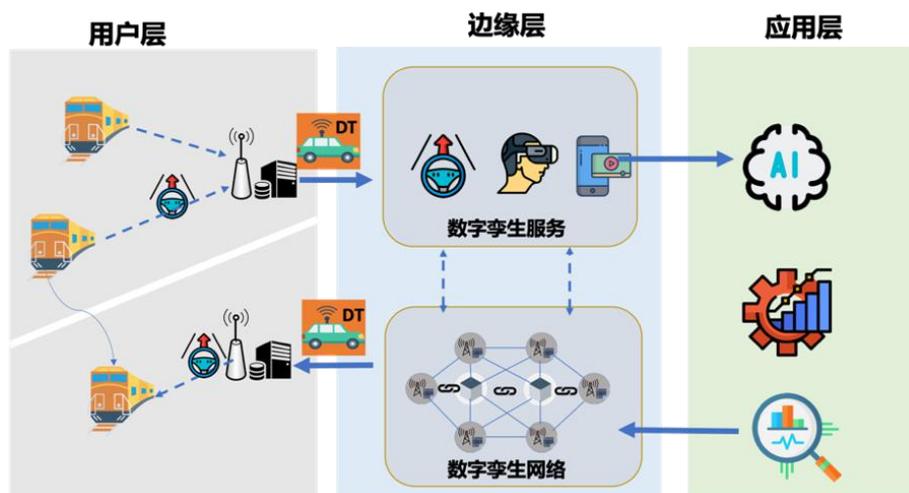


图 18 轨道交通数字孪生网络架构模型

考虑智能交通网络的结构特点，轨道交通数字孪生网络架构如图 18 所示。整个网络模型分为三个部分，分别为用户层、边缘层、应用层。其中用户层由车辆与物联网终端设备等组成。在边缘层，每个用户层物理实体具有一个数字孪生画像，运行于边缘服务器之上。由于用户层物理实体间所存在的关联，边缘层每个数字孪生体之间同样相互连接，并进一步形成数字孪生网络。运行在边缘层的数字孪生网络可以动态实时的反映轨道交通系统的运行状态与实体间的相互关系。在应用层，基于人工智能算法等对数字孪生网络进行计算分析，从而为用户层运行提供进一步的决策与反馈。

当前，数字孪生驱动的智能轨道交通系统仍面临着如下挑战。首先，数字孪生体是对物理实体的完全映射。轨道交通网络中包含着海量的传感器终端和物联网节点，以及复杂的列车运行系统。如何基于有限的资源对复杂多变的轨道交通系统进行数字孪生建模，是当前构建轨道交通数字孪生网络需要解决的关键挑战。其次，基于设备历史及当前运行数据所构建的数字孪生模型，由于传输过程及数据训练过程的损失，与物理实体的真实状态难免存在一定的误差。如何最大限度的减小数字孪生体与轨道交通物理实体间的误差，提升系统容错能力，仍然需要进一步研究。此外，如何基于所构建的数字孪生网络，结合分布式人工智能等分析技术对轨道交通系统进行状态预测以及业务决策，也是未来需要关注的重点。

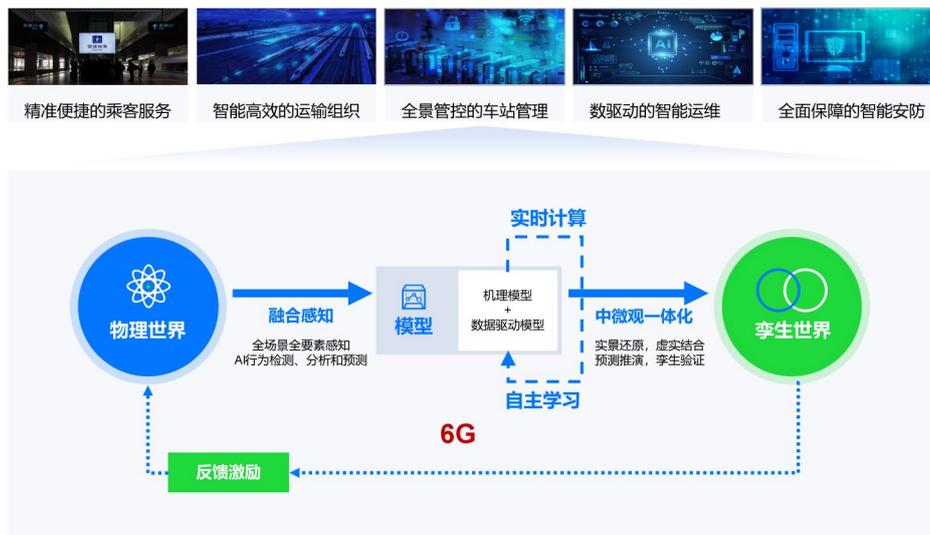


图 19 6G 轨道交通数字孪生模型

6G 可以更好的支撑轨道交通数字孪生应用构建。在轨道交通的设备物联方面，实现多专业系统、多接口类型、多通信协议的规范化系统设备接入，提高轨交各专业系统设备接口调试效率。如图 19 所示，构建轨交系统设备物模型体系，将传统轨交系统设备映射到数字空间，实现系统设备的全生命周期的抽象建模，提高系统设备运维管理效率。基于平台数字孪生建模能力进行车站、列车建模仿真，将轨交设备状态信息映射至数字孪生空间，提供轨交系统设备场景联控的虚拟化呈现和自主化配置，提高轨交各专业系统场景联动能力。基于行业知识沉淀和专家经验，构建轨道交通全生命周期运行管理的基础机理模型；基于轨交系统基础要素的全面数字化以及动态要素的全面感知、实时计算，构建基于海量数据、人工智能的数据驱动模型；融合机理模型和数据驱动模型，实现轨道交通全场景全要素的数字孪生构建，并根据预测推演、孪生验证结果等实时反馈激励物理轨道交通系统。

6G 轨交数字孪生通过全量汇聚的生产、管理和经营类系统数据，可按主题域进行跨专业、跨业务的数据资产沉淀、融合，为智慧轨道交通的创新应用提供数据支撑及服务开放。通过互联网云原生架构，将相关数据模型、业务模型通过微服务的方式开放和共享给生态合作伙伴，实现合作伙伴应用的快速接入，进而达成产业生态应用互联互通的目标。应用开发可基于平台沉淀的可复用、通用化的组件能力，灵活调用及便捷组合，使开发边际成本极大降低，有效打破传统轨交系统烟囱式的固化边界。通过软件资源编排、服务器节点管理、脚本自动化执行、日志检索等平台运维管理工具，实现在资源的全生命周期管理中提供完备的监控、告警、自愈的机制，有效减少运维人力成本。

5. 轨道交通物联网技术

5.1. 高铁物联网监测及传输技术

5.1.1. AI 助力的铁路物联监测技术

随着高铁物联网的不断部署，高铁信息系统中海量数据访问和处理需求的不断提高，致使传统的计算方法无法满足新的数据处理需求。而人工智能技术可以填补数据分析和智能决策之间的空白，结合人工智能的高铁物联网是未来的必然发展方向。

目前，AI 融合物联网形成了 AIoT (AI+IoT) 技术。一方面，物联网为人工智能提供了海量的感知数据；另一方面，人工智能的引入大大增强了物联网的信息处理能力。将人工智能融合到高铁物联网的价值主要体现在综合安全监控、视频采集和分析、故障诊断和辅助决策等方面：

(1) 设备和设施的智能诊断和预测性维护

通过高铁物联网，可监控设备和设施的状态。然后将人工智能与模式识别、聚类分析和专家系统相结合，建立自动分析模型，提前预测可能出现的故障，从而提供有价值的预测性维修建议。

(2) 智能综合监控

利用计算机视觉，摄像机采集视频信息，然后通过智能图像处理、状态识别、空间形状描述、几何建模和运动跟踪，机器可以自动检测、识别、跟踪和测量视频数据中的目标对象。从而可以取代人眼的功能，实现智能化综合监控。

(3) 智能决策

基于传感器采集的列车外部环境、线路网络状态、车站状态等复杂信息，结合当前交通流和货流，智能识别生产场景，优化车辆流径，利用人工智能技术可以有效地调整调度计划，做出科学的预测、决策和建议。

如图 20 和图 21 所示，可使用带计算模块的高像素红外摄像机捕获铁路转辙机位置图像，其中原始图像经过处理，并通过在线计算机视觉分析局部提取特征。同时，视频数据、道岔转辙机位置信息、温度、湿度、振动等数据通过通信线路传送到计算中心，通过人工智能算法进行学习。因为通过长期监测可以积累大量数据，利用深度学习可以训练一个有效的模型来提高报警精度。

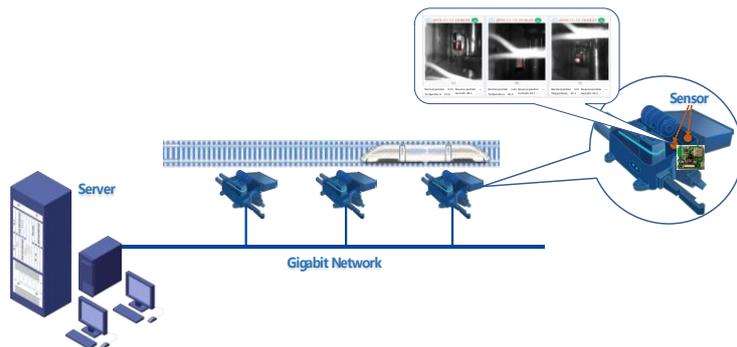


图 20 机器学习辅助的铁路高精度转辙机预警系统

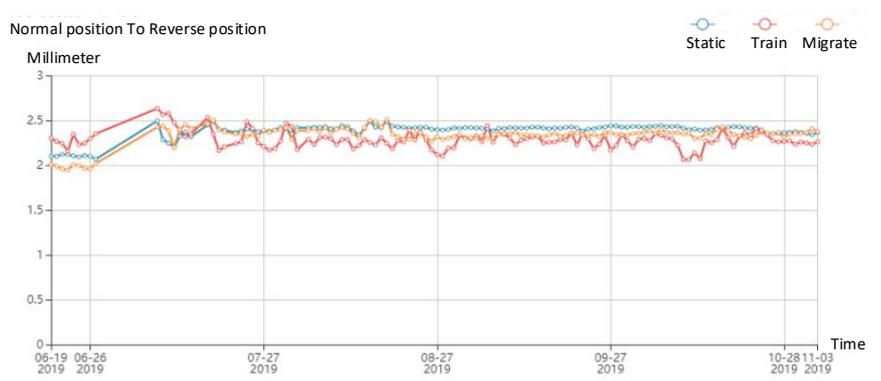


图 21 机器学习辅助的铁路高精度转辙机实验结果（精度在 0.1mm 以内）

5.1.2. 时域功率分配增强的铁路传输技术

先进无线通信技术提供的海量网络接入、超低延迟和高可靠性传输以及超高的信息传输速率大大促进高铁系统的信息服务能力。首先，网络的巨大连接容量有助于实现高铁沿线的全覆盖，从而推动铁路经济带的发展。其次，网络的大带宽能力可以支持机车、动车组等大量监控数据的下载，实现大量车辆的地面传输。再次，借助网络的低延迟功能，乘客可以浏览视频，更好地享受在线购票、在线订购、中间换乘等信息服务。

未来 6G 网络将融入很多自适应网络优化技术。例如，为降低切换频率，可以采用新型通信的控制数据平面解耦架构，沿轨道部署分布式天线，如图 22 所示。进一步采用时域功率分配策略来降低切换失败概率和通信中断概率，根据 GPS 定位和位置预测等技术，在列车离基站远的时刻采用较大功率发送数据，在离基站近的地方，按设计目标适当调低功率，这样可在整个高铁通信系统能量消耗不增加的情况下，有效改善高铁车-地通信随时间剧烈变化的远近效应问题，同时可增大越区切换中当前小区与目标切换小区接收功率的信道差异辨识度，进而提升切换的成功率并降低切换过程中的通信中断概率。如图 23 所示，通过新型通信架构的辅助和时域功率调节技术，切换失败概率和通信中断概率可以分别降低约 20%和 15%。

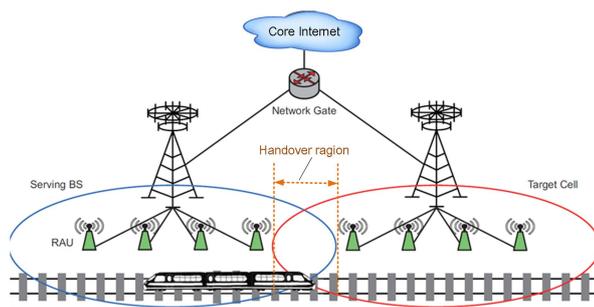


图 22 5G 控制-数据平面分离架构的高铁通信网络示意图

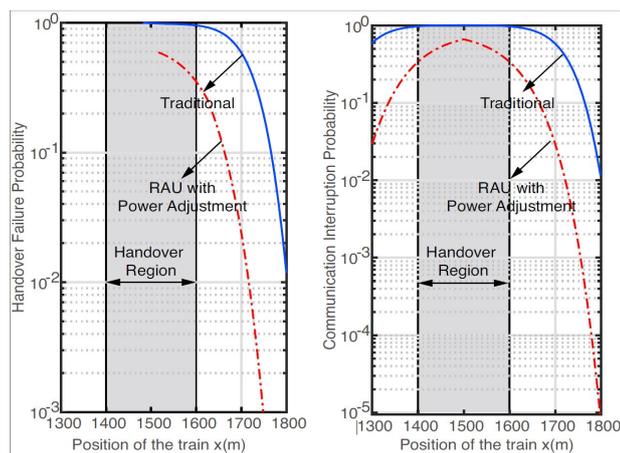


图 23 采用时域功率调节技术后对切换成功率的提升实验结果

5.1.3. 无线射频供电驱动的高铁物联网技术

在未来的高铁物联网中，将部署大量的传感设备，由于铁路沿线环境复杂多变，使得人工网络节点电池管理的成本和危险非常高。采用射频（RF）能量采集技术可为低功耗物联网节点设备供电并驱动其采集和传输数据。如图 24 所示，传感器可从附近基站或一些专用射频发射点发送的无线电磁波信号中采集能量，部分设备也可由安装在列车上的射频发射机供电驱动。图 25 显示了不同移动速度下，移动列车和地面物联网设备链路中的可实现信息能量（I-E）区域。可以看出，列车的移动速度越低，可实现的 I-E 区域越大，并且在收获的能量和接收到的信息之间存在权衡。

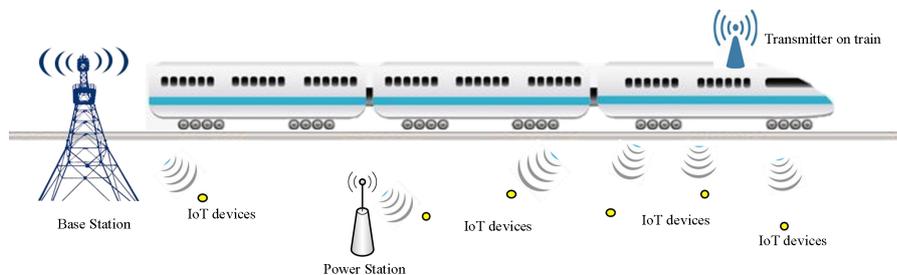


图 24 无线能量传输驱动的高铁物联网

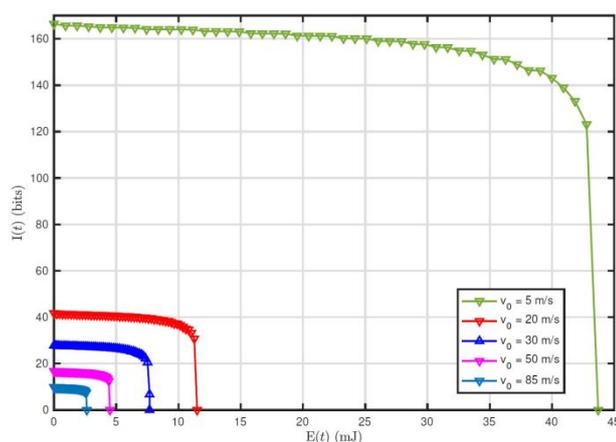


图 25 无线能量传输驱动的高铁物联网传输性能

5.1.4. 无人机辅助的高铁物联网传输计算技术

在铁路沿线部署大量的物联网基础设施，成本高、开销大。由于无人机具有高灵活性和低成本的优势，可采用无人机为一些场景下的高铁物联网应用提供无线通信和计算服务。如图 26 所示，通过使用配备摄像头、无线通信模块和计算机的无人机，可以定期扫描轨道沿线的路基和电力线。考虑到所记录的视频或图像数据的量可能太大，而无人机的计算能力有限，可以将捕获的数据卸载到附近的基站以实现边缘计算。此外，由于无人机的可用能量有限，通过自适应调整飞行速度和卸载数据量，无人机与基站提供的地面边缘计算协同完成计算任务。由于无人机本身能量有限，可通过轨迹优化、强化学习等技术自适应控制无人机的巡航轨迹和飞行姿态。图 27 给出了无人机辅助的高铁物联网无人机速度自适应控制实验结果，显示了无人机的速度与轨迹上的时隙的关系。当无人机接近基站时，其飞行速度较慢，当无人机离开基站时，其飞行速度逐渐加快。

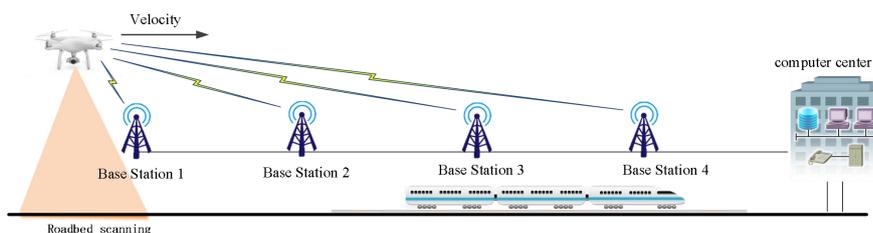


图 26 无人机辅助的高铁物联网

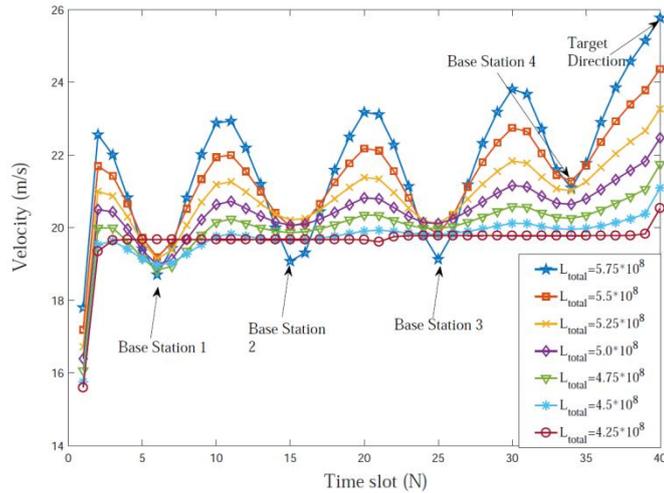


图 27 无人机辅助的高铁物联网无人机速度自适应控制实验结果

5.2. 绿色物联网反向散射技术在 6G 轨道交通中的应用

无源反向散射通信技术是物联网新兴的技术之一，其能让传感器摆脱电池的束缚，降低无线传感器的成本，在 6G 和智慧物联网中有广泛的潜在应用需求。

无源反向散射标签结合轨道交通场景 6G 网络，有两个典型应用场景：1) 低功耗低成本的货物及人员有效跟踪和识别；2) 隧道信号和覆盖绿色增强。

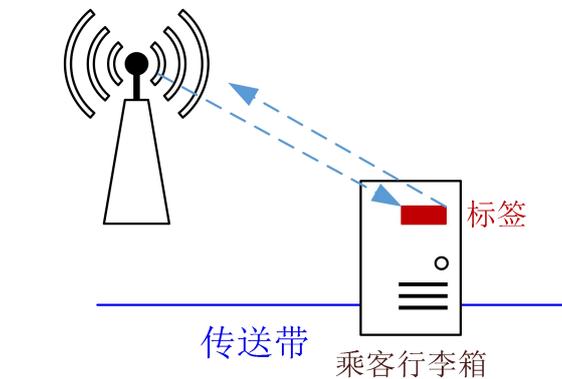


图 28 乘客行李箱在 6G 轨道交通系统中的定位和抵达时间预测

轨道交通系统中货物跟踪和人员有效定位可以保障火车站及车辆的正常稳定运行。例如，对于在遇到突发状态时，通过调度平台调度距离最近的业务对口工作人员处理问题效率明显，且意义重大。利用无源标签结合铁路内部 6G 网络，可以做到低功耗低成本的货物和人员有效跟踪和识别。将来乘客可以进入火车站台托运行李，下车自动取行李。例如工作人员配备标签，标签和铁路专属 6G 网络相互通信，识别该标签并定位。又例如货运物品或者乘客行李箱贴上简易标签，在整个轨道交通系统内传输过程中能定位跟踪到该行李箱，乘客打开铁路 12306 的 APP 相关链接能看到该行李箱当前位置和行李的预测抵达时间，如图 28 所示。

铁路隧道是轨道交通的典型场景。目前隧道内无线通信系统主要问题在于接收信号质量差、连续性弱及出现覆盖盲区等问题。在隧道覆盖的建设中，多采用内部架设泄漏电缆或有源中继的方案以满足用户通信及各种隧道安防设备数据

传输需求。隧道中联合部署分布式标签和有源中继节点，能有效降低成本并提高传输效率，如图 29 所示。

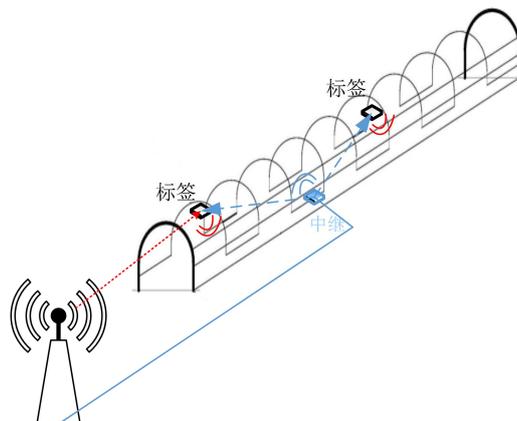


图 29 联合部署分布式标签和中继节点

5.3. 面向智能高铁的基于 6G 的海量机器类通信

随着轨道交通信息化和智能化的发展，未来将有海量的传感器、监控等数据采集装置部署在轨道交通系统，如图 30 所示。智能高铁将利用海量机器类通信实现高铁及沿线基础设施的全生命周期智能检测与维护，以及列车运行中的全天候环境智能感知，从而保障智能高铁的安全运行。为了保证高速列车的行驶安全，通信网络一方面要能够满足海量设备的接入，另一方面要能够保证数据的低时延高可靠传输。然而，现有的接入技术不足以支持海量设备高可靠低时延的接入。6G 需要更加高效可靠的接入方案来保障高可靠低时延的海量机器类设备接入和数据传输，提高有限资源可以支持的机器类设备的数量。免授权的随机接入可以避免繁琐的调度流程，通过避免控制信令来显著降低设备接入的开销，因此十分适用于机器类通信的小数据包传输。然而，由于有限的时频传输资源，面向海量设备的免授权随机接入过程会在接收端造成多个活跃用户数据的叠加。非正交多址接入通过多用户在码率、功率域等的复用允许多个用户共享相同的时频资源，因此不仅能够提供更高的频谱利用率，也能够提供较高的连接过载率，使系统可以利用有限频谱资源来服务大规模连接用户。若要通过稀缺的无线电资源支持海量机器类通信中的大规模连接，在设计多址接入协议时需要适用非正交接入。

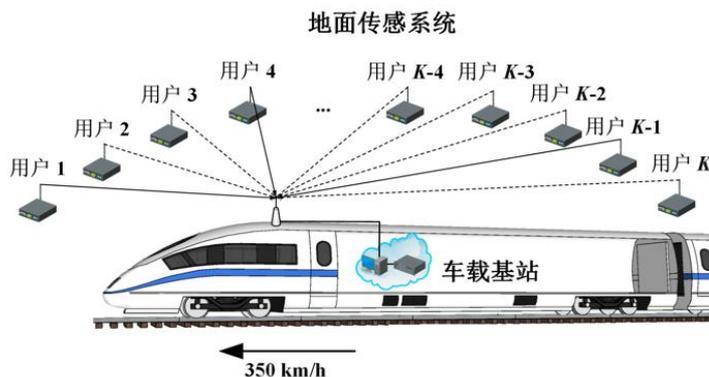


图 30 大规模轨道交通车地传感通信场景

面向海量机器类型设备的零星上行通信，利用该特性带来的稀疏性，可以使用基于压缩感知的多用户检测（CS-MUD）技术实现海量用户的接入。

在基于 CS-MUD 的接入算法中，用户可以采用免授权的随机接入，接收端通过多用户检测确认哪些用户是活跃的，并利用 CS 算法恢复活跃用户的数据。该方法可以通过避免繁琐的调度流程及控制信令来显著降低设备接入的开销。此外，CS-MUD 还可以通过利用各种先验信息的检测算法、联合的设备活跃度检测和信道估计算法以及在多天线系统中的接入方案等提升接入算法的性能。

但是，在高铁的应用场景中，存在着信道快速时变、多普勒效应、频繁的越区切换等相关问题，直接影响着信道估计和信号检测的性能，降低传输效率。同时，面向智能高铁的海量机器类通信要求能够在保障海量用户接入的同时保障低时延和高可靠性。因此，如何在高铁的应用场景下，满足海量机器接入的同时保证系统的低时延和高可靠性，是实现高铁智能感知的核心难题。通过设计面向高铁场景的专用接入协议，可以有效的降低高铁应用场景中的快速时变信道等问题所带来的影响，提高系统接入的准确率，降低接入时延。

5.4. 通信感知一体化

十四五期间，我国铁路将围绕川藏铁路建设、西部边疆铁路网建设、“八纵八横”高铁网建设、普速铁路网覆盖、城市群都市圈城际铁路和市域（郊）铁路发展这五个方面进行重点的规划建设。预计 2025 年底，全国铁路营业里程将达 16.5 万公里左右，其中高铁（含部分城际铁路）5 万公里左右、覆盖 95% 以上的 50 万人口以上城市，基本形成“全国 123 高铁出行圈”，从而更好满足人们美好出行需要。为此，铁路建设应以建设智能铁路为主攻方向，全力构建一体化信息集成平台，建设覆盖战略决策、经营开发、运输生产、建设管理、资源管理和综合协同六大业务领域的信息系统，构建网络安全和信息化保障体系，提升信息化支撑生产经营、客户服务、开放共享三大能力。针对铁路建设、装备、运营的各个环节和场景，在勘察设计、工程施工、建设管理、移动装备、通信信号、牵引供电、检测监测、客运服务、运输组织、养护维修等十大领域推进信息化、智能化，实现体系化的智能高铁技术需要我们在 5G 落地应用中不断深化，也需要在未来 6G 轨道交通中进行支撑和实现。

随着轨道交通的信息化和智能化发展，未来轨道交通系统中的传感器数量将越来越多。智能高铁将利用这些传感器网络感知列车位置、列车周边环境，以及高铁及沿线基础设施，从而保障智能高铁的安全运行。此外，轨道交通系统中的无线通信频段向毫米波、太赫兹和可见光等更高频段发展，与传统感知频段将产生越来越多的重叠。如何在相同的频谱中同时实现感知和通信功能是未来轨道交通系统中的一个关键问题。为了保证高速列车的行驶安全，既需要高可靠低时延的通信网络，又需要大范围高精度的传感网络。然而，现有传感系统和通信系统各自独立工作，大量的传感设备与通信设备将导致恶劣的电磁环境与拥挤的频谱，极大的影响轨道交通系统中的通信质量与感知精度。智能高铁需要一种新的通信感知一体化系统，同时兼顾感知功能与通信功能，整合通信与感知资源，提高通信质量与感知精度。而在现有轨道交通系统中，感知系统与通信系统通常是独立设计的。通过专用化设计，现有感知系统和通信系统能够分别实现优越的感知性

能和通信性能。但现有感知信号，如线性调频脉冲（LFM）信号，无法携带大量的通信数据，而通信信号，如正交频分复用（OFDM）信号，很难用以实现高精度的感知工作。所以在一次（电磁波）传输过程中，需要一种新的信号设计方案来同时实现感知和通信功能。

通信感知一体化技术是一种基于软硬件资源共享或信息共享，同时实现感知与通信功能协同的新型信息处理技术，可以有效提升系统频谱效率、硬件效率和信息处理效率。利用无线通信网络和设施，以通信-感知一体化（通感一体化）为核心技术，构建一体化的信息采集与传输系统，结合后端云处理，实现 6G 轨道交通的透彻感知与全息感知，支撑全场景、全频段、全覆盖的智能高铁信息感知、传输、处理与控制系统。

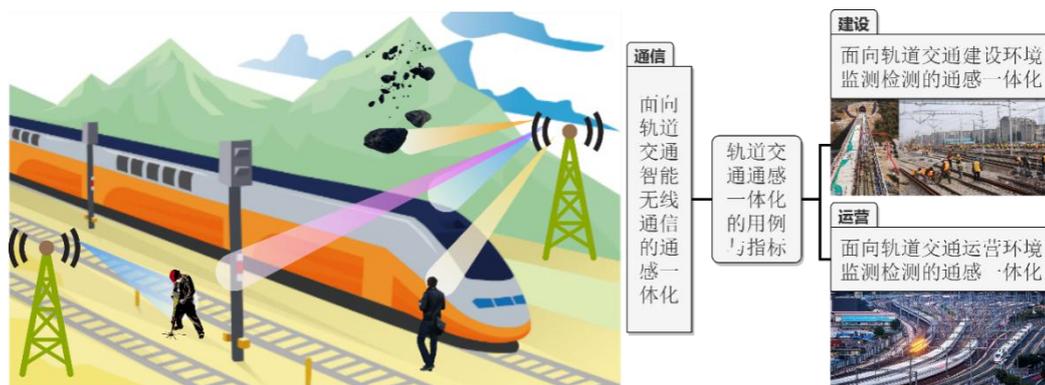


图 31 6G 轨道交通通信-感知一体化的典型场景与应用领域

图 31 给出了 6G 轨道交通运营过程中通信-感知一体化技术的一种典型场景，实际上该场景也涉及到车地通信系统与轨道交通的建设与运营两个领域。在智能交通复杂的应用场景中，通信业务和感知业务的信息处理流程呈现出工作时空域互相重叠、功能互相影响、都依赖于大宽带频谱和大孔径天线的高度耦合特征。利用同一套设备或共享部分设备器件实现通信与感知，降低设备成本、体积和功耗，将会是未来智能高铁中的一项关键技术。通信感知一体化方案将使得感知系统与通信系统从竞争走向协同，在满足未来智能高铁所必需的高可靠、低时延通信能力与大范围、高精度感知能力的同时，降低硬件成本、减少频谱开销、提高能量效率。此外，超大规模天线、人工智能、大带宽、智能超表面等技术的发展将进一步提升通信感知一体化技术的整体性能。

目前对通信和感知的理论框架还停留在各自的领域，需要针对通感一体化系统建立新的理论，探索通感一体化系统的最佳性能边界和性能折中。而当前通信感知的空口与信号处理技术难以同时满足感知和通信的需求，还要持续探索新的一体化设计方案，研究最优的空口方案。此外，目前缺少一体化的传输协议，为了实现感知和通信体制的进一步融合，需要设计新的一体化传输协议和系统架构，以实现两者的协同传输。通感一体化需要一套硬件同时支持通信和感知功能，而高可靠、低时延通信和高精度、大范围感知对硬件的需求不同，因此统一的低成本硬件平台设计也是后续通感一体化需要解决的问题。

在 6G 轨道交通无线通感一体化的研究与应用中，主要存在如下难点与挑战。

(1) 轨道交通通感一体化的用例与性能指标

通感一体化技术在 6G 轨道交通领域的应用需要以典型场景、典型用例为牵引，通过核心问题的梳理确定通信、感知以及两者互相折中或互相强化的性能指标体系。与传统的轨道交通无线通信系统相比，6G 轨道交通无线通感一体化需要在硬件设备、信号处理算法、通信协议等方面尽可能复用无线通信中的设计范式与模块，同时也需要以通信系统为出发点，深入探究轨道交通的需求与无线信号处理的能力边界，将新的信号波形设计、新的系统架构、新的信号处理范式融入无线通信系统，进而建立起通信、感知性能的折中机制，打通通信与感知的跨领域屏障。为此，急需针对智能高铁十八个方向，即空天地一体化工程勘察、基于 BIM 工程设计、桥隧路轨工程智能化施工、客运站工程智能化施工、四电工程智能化施工、基于 BIM+GIS 工程建设管理、智能动车组、智能综合检测车、信号、通信、智能牵引供电、智能检测监测、智能客运、智能票务、智能综合调度、智能行车调度、工电供一体化运维、动车组智能运维等，逐个辨析通感一体化的潜在用例与性能指标，深入分析与总结几类典型用例与关键性能指标集，探究传统无线通信系统与设计范式的适用性与扩展性要求，提出 6G 轨道交通一体化的关键技术组合模式与需求，支撑 6G 轨道交通场景下的智能高铁建设。

(2) 面向轨道交通建设环境监测检测的通感一体化

高铁勘察设计与工程施工的建设过程中，需要对轨道交通的环境进行实时、准实时的监测检测，对环境各要素、各状态进行全过程的透彻感知。同时，在勘察设计与工程施工阶段，无线通信基础设施存在覆盖深度与广度有所欠缺、网络连接可能中断、网络拓扑与部署发生改变等挑战。因此，需继续开展如下几个方面的研究：面向轨道交通典型场景的全频谱适用技术辨析，探究综合复杂的轨道交通系统中不同场景和环境工况所适配的通感一体化工作频段或频段组合，探究 2400 MHz 和/或更高频段无线信号的适用性；基于无线射频信号的同步成像和制图，如环境地图，支撑不同时空尺度下暴露空间的环境重构，支持不同时空尺度下滑坡、落石等现象的监测检测，进而作为信息基础设施的一种基本能力辅助自动驾驶、智能建造、智能运营；基于无线射频信号的山体、隧道等高精度结构监测，探索环境状况、结构应力等因素对无线信号传播的影响机理，进而反演环境状况与环境内部结构，支撑非暴露空间在不同时空尺度下的应力、位移等监测检测；基于信道状态信息（CSI）或接收信号强度（RSSI）的多基站协作感知，支撑轨道交通建设环境中物体、车辆等目标的动态识别、动态跟踪与动态预警。

(3) 面向轨道交通运营环境监测检测的通感一体化

轨道交通的建设管理、移动装备、牵引供电、养护维修涉及大量人员及设备的安全检测、人员管理、设备管理等工作。从客观效果而言，传统条条框框的管理机制获得了良好的效果，但其代价是带来了极大的人力成本和管理成本，也存在相关人员责任与压力负荷长期较重等挑战。未来智能高铁的发展需要支持全过程数字化管理，实现减员增效的基本目标。为此，需要重点研究：基于无线信号的光谱分析，例如空气质量、CO₂ 排放等，以铁路通信网络为基础设施，以通感一体化为技术手段，提供全国范围内，特别是经济发达地区的实时基础数据，支

撑轨道交通行业碳达峰、碳中和战略目标的实现；基于无线信号的工件裂缝检测，例如轮轴、轨道板、车厢、隧道、混凝土等，以通感一体化为技术手段，支持在线无损探伤、无损检测；基于通感一体技术的高铁路基沉降变形检测，相比于常规的全站仪、激光测距机、液体沉降系统等检测方法，支持全天候、全自动实时检测，并依托于后台数据处理，形成全生命周期的监测、检测与预警；面向轨道交通车站场景，基于通感一体化实现乘客的姿态识别、安全检测、禁限带物品的检测、人物关联，实现重点人员的时空一致性跟踪，从而支撑智能安检，支撑高精度流调与密接人群的精准分析，提高车站效率与安全。

（4）面向轨道交通智能无线通信的通感一体化

面向智能轨道交通的发展，无线通信系统的发展需要重点解决如下挑战：高效的车地无线通信与车车无线通信、绿色低碳的无线通信与通信网络、基于透彻感知的智能无线通信赋能智能高铁。为此，面向轨道交通智能无线通信的通感一体化技术，需继续重点突破如下关键挑战：面向未来超级高铁的发展，探究基于通感一体化的多普勒扩展补偿，降低无线通信的信令开销；面向轨道交通作业场景的典型特性，研究基于通感一体化的波束管理，降低甚至避免波束管理引入的信令开销，提高系统频谱效率和系统响应速度，降低能耗；面向轨道交通典型场景，研究基于通感一体化的高精度定位，降低对当前列车定位，如地面应答器的强烈需求，从而支持在线全程高精度定位，支撑无人驾驶、减小追踪间隔，从而提高运营效率；面向轨道交通典型场景，研究基于通感一体化的入侵检测，实现全天候无差别的电子围墙和入侵对象的轨迹与姿态跟踪；研究基于通感一体化的轨道交通透彻感知，为指挥决策提供可靠的信息，实现“看得更远，看得更高，看得更清，看得更全面”；研究基于人工智能的通感一体化增强技术，以通感一体为手段获取的海量数据为基础，以场景、应用适配的算法为核心，构建基于大数据的轨道交通场景数据库，突破感知辅助通信的信息论瓶颈，将不同域（Domain）的先验信息进行融合，从而有效提升无线通信的效率、提升高铁的智能化水平。

参考文献

- [1] 国务院, 国发〔2021〕27号《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》, 2021年12月9日.
- [2] B. Ai, A. F. Molisch, M. Rupp and Z. -D. Zhong, "5G Key Technologies for Smart Railways," in Proceedings of the IEEE, vol. 108, no. 6, pp. 856-893, June 2020, doi: 10.1109/JPROC.2020.2988595.
- [3] IMT-2030 (6G) 工作组, 通信感知一体化技术研究报告, 2021.
- [4] You, X., Wang, CX., Huang, J. et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. Sci. China Inf. Sci. 64, 110301 (2021).
- [5] 张平, 牛凯, 田辉, 聂高峰, 秦晓琦, 戚琦, 张娇. 6G 移动通信技术展望[J]. 通信学报, 2019, 40(01):141-148.
- [6] 尤肖虎, 尹浩, 邬贺铨. 6G 与广域物联网[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 3-11.
- [7] Niu, Z., Zhou, S. and Crespi, N. (2021). Greening 6G. In Shaping Future 6G Networks (eds E. Bertin, N. Crespi and T. Magedanz).
- [8] 范平志, 李里, 陈欢, 程高峰, 杨林杰, 汤小波. 面向大规模物联网的随机接入: 现状、挑战与机遇. 通信学报 [J], 2021, 42(4): 1-21 doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2021098
- [9] “White paper on Evolved Random Access and Multiple Access Transmission Technologies”, 未来移动通信论坛, 2021.12.21
- [10] 刘杨, 彭木根. 6G 内生安全: 体系结构与关键技术[J]. 电信科学, 2020, 36(01):11-20.
- [11] 江伟玉, 刘冰洋, 王闯. 内生安全网络架构 [J]. 电信科学, 2019, 35(09):20-28.
- [12] 刘杨, 李珺, 陈文韵, 彭木根. 面向 6G 的雾无线接入网内生安全数据共享机制研究[J]. 通信学报, 2021, 42(01):67-78.

- [13] 刘贞,何跃鹰,丁欢.轨道交通列控系统网络安全风险和防护对策研究[J]. 铁路通信信号工程技术,2020,17(12):1-7.
- [14] 游伟,李英乐,柏溢,等.5G核心网内生安全技术研究[J].无线电通信技术,2020,46(4):385-390.
- [15] 高枫,马铮,张曼君,等.5G网安全部署探讨[J].邮电设计技术,2019,4:45-48.
- [16] 翟立君,王妮炜,潘沐铭,等.6G无线接入关键技术[J].无线电通信技术,2021,47(1):1-11.
- [17] 刘光毅,金婧,王启星,董静,楼梦婷,黄宇红,陈志伟,冯瑶.6G愿景与需求:数字孪生、智能泛在[J].移动通信,2020,44(06):3-9.
- [18] 聂凯君,曹宾,彭木根.6G内生安全:区块链技术[J].电信科学,2020,36(01):21-27.
- [19] 丁珊.基于深度学习的入侵检测关键技术研究[D].北京交通大学,2018
- [20] 汤凯.基于5G的垂直行业安全新特征与对策[J].中兴通讯技术,2019,25(4):50-55.

致谢

- ◇ 北京交通大学：艾渤，卢云龙，沈超，陈为，何睿斯，章嘉懿，熊轲，牛勇，王方刚，王公仆，王海波，吴昊，林思雨，马国玉，杨汨，费丹，刘留，朱力，丁建文，钟章队
- ◇ 北京城建设计研究院有限公司：刘剑锋，李金海，邓进
- ◇ 北京京投卓越科技发展有限公司：宣晶，刘忠良，吕桐，李原
- ◇ 北京市地铁运营有限公司：白文飞，吴雁军，赵华伟，豆飞，张衡，光志瑞，陈炎，李明
- ◇ 北京协同创新轨道交通研究院有限公司：吴昊
- ◇ 北京邮电大学：张平，陶小峰，许晓东，秦晓琦，马楠
- ◇ 东南大学：尤肖虎，崔铁军，王海明，金石
- ◇ 国家高速列车技术创新中心：杜杰伟
- ◇ 鹏城实验室：陈昊
- ◇ 三星电子中国研究院：张代君，孙程君，王翥
- ◇ 神州高铁：蔡宏宇，胡斌，王迎宽
- ◇ 腾讯云计算（北京）有限责任公司：施雪松，张云飞，刘思杨
- ◇ 中车青岛四方车辆研究所有限公司：姚小强，李震
- ◇ 中国电信研究院：杨峰义，刘洋，王晴天
- ◇ 中国联通：唐雄燕，李福昌，马铮
- ◇ 中国移动研究院：刘光毅，王启星，夏亮
- ◇ 中兴通讯：段向阳，胡留军

